

# Valorisation des brasques traitées utilisées dans la production de matériaux de construction et miniers

par

Niakalé CAMARA

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAITRISE  
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE DE LA CONSTRUCTION  
M. Sc. A.

MONTRÉAL, LE 16 AOÛT 2023

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Niakalé Camara, 2023



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

## **PRÉSENTATION DU JURY**

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

Mme Claudiane Ouellet-Plamondon, directrice de mémoire  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Philippe Bocher, président du jury  
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Cécile Bulle, membre du jury  
Département de stratégie de responsabilité sociale et environnementale  
à l'Université du Québec à Montréal

Mme Annie Levasseur, membre de jury  
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 26 JUIN 2023 À 13H30

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à ma directrice, Mme Claudiane Ouellet-Plamondon de m'avoir accepté au sein de son équipe de recherche et de m'encadrer avec un sujet intéressant et prometteur pour les recherches futures dans le domaine de la construction. Je la remercie de m'avoir encadré, orienté et aidé.

J'adresse mes sincères remerciements à la compagnie Rio Tinto pour avoir financé ce projet et aussi de m'avoir découvert ce matériau si passionnant qu'est la brasque traitée.

Je tiens à remercier M. Laurent Birry, M. Hervé Gauthier et M. Esteban Gonzalez tous de Rio Tinto, d'avoir pris leurs temps pour participer à la lecture de la dernière version de ce document. Vos corrections furent importantes et précieuses.

Je voudrais aussi remercier, M. Luc Bédard de l'Association de Béton de Québec (ABQ), d'avoir répondu rapidement aux questions basées sur la durée de vie du béton et d'avoir fourni les informations importantes et nécessaires sur cette dernière.

Mes remerciements spéciaux vont à l'endroit de l'équipe de l'école polytechnique de l'analyse de cycle de vie, au personnel du CIRAIG particulièrement Julien Pedneault, qui a consacré tout son temps volontairement pour me guider et ménagé des efforts pour des rencontres zoom afin de discuter sur la partie analyse de cycle de vie.

Un grand merci à Mathieu Bendouma et Victor Brial pour leurs suivis pour leurs différentes suggestions et recommandations ainsi que leur correction du mémoire. À mes collègues de recherche de l'ÉTS Aguerata, Meriam, Thomas qui ont partagé des moments de fous rires, des sorties et ont toujours été là pour moi lorsque j'ai des questions. Leurs soutiens inconditionnels ont été d'une grande aide.

À tous les professeurs, techniciens de laboratoire et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je remercie mon très cher époux et ma maman, qui ont toujours été là pour moi, surtout dans les moments de stress où ils ont su me soutenir avec leurs techniques de thérapie personnelles afin que je garde le calme pour avancer dans mes recherches et la rédaction de ce mémoire.

## VI

Je dédie ce modeste travail à la mémoire de mon feu père parti très tôt en ce 17 mai 2022 si brutalement, mais, sache que de là où tu es, tes conseils et tes prières ont été d'un apport inestimable pour ma réussite.

Enfin, je ne manquerai pas non plus de dire un grand merci aux membres du jury pour leur patience, qui ont accepté d'évaluer cette maîtrise, d'être présent et de me donner des remarques et commentaires durant cette soutenance afin d'améliorer ce travail.

# **Valorisation des brasques traitées utilisées dans la production de matériaux de construction et miniers**

Niakalé CAMARA

## **RÉSUMÉ**

L'utilisation des brasques traitées dans la fabrication des matériaux de construction a suscité la curiosité des chercheurs scientifiques et des ingénieurs industriels afin de connaître ses impacts environnementaux et ses rôles potentiels, vis-à-vis de ses propriétés physico-mécaniques. L'objectif principal est d'évaluer le potentiel de valorisation des brasques traitées à travers leur utilisation dans les productions de béton et de remblai minier en pâte cimenté. Ce travail consiste à faire des analyses de cycle de vie ou ACV et des essais laboratoires avec des pourcentages allant de 5 à 15 % de brasques traitées comme substitut au ciment dans le béton et le remblai en pâte cimenté. Grâce à la base de données Ecoinvent et le logiciel OpenLCA selon les normes ISO 14040 et 14044, les études d'ACV sont réalisées avec la méthode ReCiPe Midpoint H. Des essais laboratoires sont réalisés avec l'ajout de brasques traitées dans les recettes du béton et du remblai en pâte cimenté provenant de la mine LaRonde. D'autres liants comme le laitier de hauts fourneaux et la cendre volante sont utilisés afin de faire des comparaisons au niveau des résultats. Les résultats d'ACV montrent que le ciment est le matériau qui contribue fortement aux impacts et présente aussi un bilan carbone remarquablement élevé dû à la phase de calcination de ses matières premières à 1450°C pour fabriquer le clinker. Le transport par camion est le deuxième facteur contributeur au gaz à effet de serre. L'eau et le plastifiant sont des éléments qui ne génèrent que très peu d'impact. Le gravier et le sable présentent de fortes contributions au niveau de la transformation naturelle des terres et des émissions moyennes au niveau des différentes des autres catégories sélectionnées. Les empreintes carbonées du LCLL Ash (Low Caustic Leaching and Liming Ash) et du LCLL Ash calciné sont moyennes voir faibles. Leurs utilisations représentent une solution prometteuse et intéressante pour réduire les impacts environnementaux liés à la production du béton. Les résultats des analyses de sensibilité basée sur la calcination montrent une différence mineure entre les valeurs trouvées des impacts. L'utilisation du LCLL Ash calciné considéré comme une argile calcinée à 800, 1000 et 1450°C est une technique prometteuse pour contrer l'épuisement des ressources naturelles pour les matériaux de construction et constitue aussi un moyen efficace de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'utilisation du ciment dans la production du béton. Quant à l'analyse de sensibilité sur le transport, les impacts générés lorsque le transport de la cendre volante se fait par camion pour fabriquer du béton présentent des valeurs qui se rapprochent beaucoup plus à celle de la cendre volante transportée par bateau depuis l'Italie, bien que la distance pour amener de la cendre volante depuis l'Italie soit grande (7563,39 km). L'analyse de sensibilité basée sur la calcination présente de faible variation entre les impacts. Cette différence mineure entre les valeurs est influencée par le choix des hypothèses en tenant compte des paramètres de la

## VIII

calcination (type de calcination, type de four, type de combustible pour calciner). Les résultats des mesures de la teneur en air montrent que les bétons fabriqués présentent des teneurs dont les valeurs sont comprises entre 2,51 et 3,70 %. Ces résultats sont inférieurs à la teneur en air d'un béton à l'état frais qui se situe généralement entre 5 et 8 %. Les températures mesurées sont comprises entre 19,6 et 21 °C et sont des valeurs comprises dans la tranche de température d'un béton frais (soit 10 à 25 °C). Les résultats des mesures des résistances montrent que l'ajout du LCLL Ash dans la recette amène une diminution de la résistance à la compression par rapport au remblai fabriqué avec du laitier de hauts fourneaux et une augmentation de la résistance par rapport au béton fabriqué avec du 100%GU. L'utilisation du laitier de hauts fourneaux dans le remblai présente une meilleure résistance à la compression que l'utilisation du LCLL Ash. Quant au béton fabriqué avec du LCLL Ash, leurs résistances à la compression sont un peu plus similaires aux bétons fabriqués avec de la cendre volante avec une différence mineure. Le LCLL Ash maintient la résistance à la compression du béton aux différents âges de durcissement (7 j, 28 j, et 90 j) et son utilisation est prometteur dans la production du béton comme ajout cimentaire.

**Mots-clés :** brasques traitées, remblais miniers, analyse de cycle de vie, ajouts cimentaires, liants, matériaux, impacts environnementaux, facteurs d'impacts, béton, remblai minier.



# **Valorization of treated spent pot lining used in the production of construction and mining materials.**

Niakalé CAMARA

## **ABSTRACT**

The use of treated spent pot lining in the manufacture of construction materials has aroused the curiosity of scientific researchers and industrial engineers in order to know its environmental impacts and its potential roles, with respect to its physical-mechanical properties. The main objective is to evaluate the potential of valorization of treated spent pot lining its use in the production of concrete and mining backfill. This work consists in performing life cycle analyses or LCA and laboratory tests with percentages ranging from 5 to 15% of treated spent pot lining as a cement additive in concrete and mining backfill. Using the Ecoinvent database and OpenLCA software according to ISO 14040 and 14044, LCA studies are performed with the ReCiPe H method. Laboratory tests are carried out with the addition of treated spent pot lining in the recipes of the concrete and paste backfill from the LaRonde mine. Other binders such as blast furnace slag and fly ash are used to compare results. The LCA results show that cement is the material that contributes most to the impacts and also has a remarkably high carbon footprint due to the calcination phase of its raw materials at 1450°C to manufacture clinker. Transportation by truck is the second largest contributor to greenhouse gases. Water and plasticizer are elements that generate very little impact. Gravel and sand have high contributions to natural land transformation and average emissions at the different levels of the other selected categories. The carbon footprints of LCLL Ash (Low Caustic Leaching and Liming Ash) and calcined LCLL Ash are medium to low, so their use represents a promising and interesting solution to reduce the environmental impacts of concrete production. The results of the sensitivity analyses based on calcination show a minor difference between the found values of the impacts. The use of calcined LCLL Ash considered as a clay calcined at 800, 1000 and 1450°C is a promising technique to counter the depletion of natural resources for construction materials and is also an effective way to reduce CO<sub>2</sub> emissions related to the use of cement in concrete production. As for the sensitivity analysis on transportation, the impacts generated when fly ash is transported by truck to make concrete show values that are much closer to that of fly ash transported by ship from Italy, although the distance to bring fly ash from Italy is large (7563.39 km). The sensitivity analysis based on calcination shows little variations between impacts. This minor difference between values is influenced by the choice of assumptions considering calcination parameters (type of calcination, type of kiln, type of calcination fuel). The results of the air content measurements show that the manufactured concretes have contents with values between 2.51 and 3.70%. These results are lower than the air content of a fresh concrete which is generally between 5 and 8%. The measured temperatures are between 19.6 and 21°C and are values within the temperature range of fresh concrete (i.e., 10 to 25°C). The results of the strength measurements show that the addition of LCLL Ash to the recipe results in a decrease in compressive strength compared to the backfill

made with blast furnace slag and an increase in strength compared to the concrete made with 100%GU. The use of blast furnace slag in the backfill has a better compressive strength than the use of LCLL Ash. As for concrete made with LCLL Ash, their compressive strengths are somewhat more similar to concrete made with fly ash with a minor difference. LCLL Ash maintains the compressive strength of concrete at different ages (7 d, 28 d, and 90 d) and its use is promising in concrete production as a supplementary cementing material.

**Keywords:** spent pot lining, mining backfill, life cycle assessment, supplementary cementing materials, binders, materials, sensitivity analysis, environmental impacts, impact factors, concrete, mining backfill.

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	5
1.1 Les brasques traitées .....	5
1.1.1 Le Spent Pot Lining (SPL).....	5
1.1.2 Le traitement des brasques.....	7
1.2 Le béton de ciment.....	9
1.2.1 La fabrication du béton .....	9
1.2.2 L'importance de l'utilisation des matériaux cimentaires supplémentaires dans le béton .....	10
1.3 Le ciment Portland.....	13
1.3.1 Définition .....	14
1.3.2 Fabrication .....	15
1.3.3 Hydratation du ciment.....	17
1.3.4 Impacts environnementaux .....	18
1.4 Les ajouts cimentaires.....	19
1.4.1 Définition .....	19
1.4.2 Type de réactivité des ajouts cimentaires .....	20
1.4.3 Les avantages de l'utilisation des ajouts cimentaires .....	21
1.5 Les agrégats .....	21
1.6 L'eau .....	22
1.7 Les adjuvants .....	23
1.8 Les remblais miniers .....	24
1.8.1 Définitions et rôle dans l'industrie minière .....	24
1.8.2 Types et caractéristiques de remblais miniers .....	25
1.8.2.1 Le remblai en pâte cimenté .....	27
1.8.2.2 Le remblai hydraulique .....	29
1.8.2.3 Le remblai rocheux .....	31
1.8.3 Composition d'une usine de remblai et principe de fabrication .....	32
1.8.4 Les problèmes techniques liés au transport .....	33
1.8.5 Les résidus miniers : types, caractéristiques et transport.....	35
1.8.5.1 Les propriétés physico-mécaniques .....	36
1.8.5.2 Les mauvaises gestions des résidus miniers : conséquences environnementaux.....	37
1.9 L'analyse de cycle de vie.....	38
1.9.1 Définition des objectifs et du champ de l'étude.....	39
1.9.2 Inventaire du cycle de vie (ICV).....	40
1.9.3 Évaluation de l'inventaire du cycle de vie (ÉICV).....	40
1.9.4 Interprétation des résultats .....	40

CHAPITRE 2 MATÉRIELS ET MÉTHODES .....	41
2.1 Définition de l'ACV .....	41
2.1.1 Définition de l'objectif et du champ de l'étude .....	41
2.1.2 Fonction et unité fonctionnelle .....	41
2.1.3 Hypothèses de l'étude .....	42
2.1.4 Méthode d'impact choisie : la méthode ReCiPe Midpoint H.....	43
2.1.5 Frontière de système .....	46
2.2 Matériel.....	53
2.2.1 Préparation des moules .....	54
2.2.2 Composants et mélange .....	55
2.2.3 Démoulage et lissage du béton .....	57
2.2.4 Préparation des échantillons de remblai .....	58
2.2.4.1 Malaxage des composants.....	59
2.2.4.2 Mise en forme des échantillons de remblai.....	60
2.2.5 Récapitulatif des échantillons préparés.....	61
2.2.5.1 Les bétons préparés.....	61
2.2.6 Conditionnement des échantillons .....	62
2.3 Méthodes de caractérisation physico-mécaniques .....	63
2.3.1 Résistance à la compression.....	63
2.3.2 Teneur en air .....	64
2.3.3 Affaissement .....	65
2.3.4 Température .....	66
CHAPITRE 3 RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS .....	67
3.1 Analyse de cycle de vie du béton.....	67
3.1.1 Analyse de comparaison .....	67
3.1.2 Analyse de contribution .....	70
3.1.3 Analyse de sensibilité .....	75
3.1.3.1 Variation du taux de substitution .....	75
3.1.3.2 Transport de la cendre volante.....	76
3.1.3.3 Température de calcination du LCLL Ash .....	78
3.2 Les performances mécaniques .....	80
3.2.1 Mesures des résistances à la compression .....	80
3.2.2 Mesures de la teneur en air, de l'affaissement et de la température .....	82
3.2.3 Mesures des résistances à la compression du remblai en pâte cimenté ....	83
CONCLUSION.....	87
RECOMMANDATIONS .....	89
ANNEXE I DÉFINITION DES NORMES UTILISÉES DANS L'ÉTUDE.....	91
ANNEXE II ANALYSES COMPARATIVES.....	95
ANNEXE III ANALYSES DE CONTRIBUTION.....	99

ANNEXE IV	RÉSULTATS DES MESURES DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DU BÉTON.....	101
ANNEXE V	FORMULATION DU BÉTON PAR SUBSTITUTIONS DE DIFFÉRENTS POURCENTAGES DES BRASQUES TRAITÉES AU CIMENT .....	105
ANNEXE VI	FORMULATIONS DU BÉTON PAR SUBSTITUTIONS DE DIFFÉRENTS POURCENTAGES DE LA CENDRE VOLANTE .....	109
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		113



## LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 1.1	Composition chimique des phases du ciment Portland.....	15
Tableau 1.2	Classification des liants et des ajouts selon leur réactivité réactivités.....	21
Tableau 1.3	Les agrégats et leurs caractéristiques .....	22
Tableau 1.4	Caractéristiques des différents types de remblais .....	26
Tableau 1.5	Résumé des types de résidus avec leurs différentes caractéristiques.....	37
Tableau 2.1	Scénarios de fabrication du béton avec LCLL Ash et/ou de la cendre volante .....	42
Tableau 2.2	Hypothèses prises en compte dans l'étude.....	43
Tableau 2.3	Catégories d'impacts de la méthode ReCiPe avec leurs unités .....	46
Tableau 2.4	Flux entrants et sortants utilisés pour fabriquer le béton avec le LCLL Ash .....	51
Tableau 2.5	Flux entrants et sortants utilisés pour fabriquer le béton avec la cendre volante .....	51
Tableau 2.6	Flux entrants basés sur le transport avec la liste des.....	53
Tableau 2.7	Formulations de bétons (1 m <sup>3</sup> ) avec du LCLL Ash .....	61
Tableau 2.8	Formulations de bétons (1 m <sup>3</sup> ) avec de la cendre volante.....	61
Tableau 2.9	Formulations des remblais fabriqués au laboratoire de l'ÉTS.....	62
Tableau 3.1	Comparaisons des types de bétons fabriqués avec 15 % de LCLL Ash .....	67
Tableau 3.2	Contribution des bétons normaux, bétons fabriqués avec avec 15% de la cendre volante, du LCLL Ash et du LCLL Ash calciné au niveau du changement climatique.....	70
Tableau 3.3	Contribution des bétons normaux, bétons fabriqués avec 15% de la cendre volante, du LCLL Ash et du LCLL Ash calcinés au niveau de la toxicité humaine .....	71

Tableau 3.4	Contribution des bétons normaux, bétons fabriqués avec de la cendre volante, du LCLL Ash et du LCLL Ash calciné au niveau de l'épuisement des métaux .....	71
Tableau 3.5	Contribution des bétons normaux, bétons fabriqués avec de la cendre volante, du LCLL Ash et du LCLL Ash calciné au niveau de l'épuisement des fossiles .....	72
Tableau 3.6	Contribution des bétons normaux, bétons fabriqués avec de la cendre volante, du LCLL Ash et du LCLL Ash calciné au niveau des rayonnements ionisants.....	72
Tableau 3.7	Contribution des bétons normaux, bétons fabriqués avec de la cendre volante, du LCLL Ash et du LCLL Ash calciné au niveau de la transformation des terres naturelles.....	73
Tableau 3.8	Impacts sur le changement climatique des bétons fabriqués avec du béton (100 % ciment), 5 %, 10 % et 15 % de LCLL Ash, et de LCLL Ash calcinés.....	75
Tableau 3.9	Résultats sur l'analyse de sensibilité sur le transport de la cendre volante .....	77
Tableau 3.10	Résultats de la sensibilité sur la calcination.....	79
Tableau 3.11	Mesures des teneurs en air, des affaissements et des températures des bétons normaux, produits avec du LCLL Ash et de la cendre volante. ....	82
Tableau 3.12	Mesures de résistance à la compression du remblai en pâte cimenté .....	83
Tableau 3.13	Mesures de résistance à la compression du remblai en pâte cimenté .....	83
Tableau 3.14	Mesures de résistance à la compression du remblai en pâte cimenté.....	84



## LISTE DES FIGURES

		Page
Figure 1.1	Composition moyenne de la brasque usée.....	6
Figure 1.2	Diagramme de flux du procédé de LCLL.....	9
Figure 1.3	Étapes de fabrication du ciment .....	16
Figure 1.4	Mécanismes de fabrication du clinker du ciment Portland. ....	17
Figure 1.5	Valeur du rapport eau/ciment en fonction de la résistance à la compression mesurée selon la norme CAN/CSA A23.2-9C .....	23
Figure 1.6	Technique de remblayage d'un chantier en exploitation.....	24
Figure 1.7	Composition des différents types de remblais.....	25
Figure 1.8	Différentes composantes du remblai en pâtes cimenté.....	28
Figure 1.9	Photos de remblai hydraulique .....	29
Figure 1.10	Composition du remblai hydraulique .....	30
Figure 1.11	Exemple de galerie à travers le remblai rocheux.....	31
Figure 1.12	Composition d'une usine de fabrication de remblais. ....	33
Figure 1.13	Photos des différents problèmes techniques rencontrés dans les industries minières .....	34
Figure 1.14	Types de résidus miniers .....	35
Figure 1.15	Classe granulométrique des résidus miniers.....	35
Figure 1.16	Effets techniques de la mauvaise gestion des résidus miniers sur l'environnement .....	38
Figure 1.17	Cadre méthodologique pour réaliser une ACV .....	39
Figure 2.1	Relations entre les données de l'ICV, les catégories d'impact intermédiaires et les catégories de dommages dans ReCiPe .....	44
Figure 2.2	Frontière des systèmes de production de béton avec du LCLL Ash .....	48
Figure 2.3	Frontière des systèmes de production de béton avec du LCLL Ash calciné .....	49

Figure 2.4	Frontière des systèmes de production de béton avec de la cendre volante .....	50
Figure 2.5	Moules en plastique prévues pour le béton frais fabriqué .....	55
Figure 2.6	Composantes pour la production expérimentale du béton .....	55
Figure 2.7	Bétonnière à tambour rotatif utilisé pendant les essais à l'ÉTS .....	56
Figure 2.8	Tige métallique servant à pilonner la pâte.....	57
Figure 2.9	Lisseuse pour le sciage du béton après 24 h de cure .....	58
Figure 2.10	Malaxeur du mélange des composants de remblai .....	60
Figure 2.11	Le type de moule utilisé dans la fabrication du remblai à l'ÉTS .....	60
Figure 2.12	Chambre humide pour des temps de cure des échantillons de béton avant les mesures de résistances à la compression .....	62
Figure 2.13	Mesure de la résistance à la compression du béton à l'ÉTS.....	63
Figure 2.14	Testeur de compressions uniaxiales (a) (Belaoura & Brara, 2020) et (b) mesure de la teneur à l'ÉTS .....	64
Figure 2.15	Mesure de la teneur en air du béton frais .....	65
Figure 2.16	Principes de la mesure du cône d'Abrams ou concrete slump-test (A) .....	66
Figure 2.17	Mesure de la température du béton frais à l'aide d'un thermomètre.....	66
Figure 3.1	Comparaisons des bétons fabriqués avec du LCLL Ash, du LCLL Ash calciné et de la cendre volante.....	68
Figure 3.2	Contribution des bétons normaux, bétons fabriqués avec de la cendre volante et du LCLL Ash calciné.....	74
Figure 3.3	Résultats des empreintes de carbone de bétons fabriqués avec du LCLL Ash .....	76
Figure 3.4	Comparaisons des résistances à la compression des bétons normaux, des bétons fabriqués avec du LCLL Ash et la cendre volante.....	81
Figure 3.5	Comparaisons des résistances relatives des bétons normaux, des bétons fabriqués avec du LCLL Ash et la cendre volante.....	81
Figure 3.6	Résultats UCS de 56 jours de cure de temps des échantillons .....	84

Figure 3.7      Effet du type de liant sur la résistance mécanique des remblais en pâte...85



## LISTE DES ABRÉVIATIONS

ACV	Analyse de cycle de vie
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
$\text{Al}_2\text{O}_3$	Alumine
$\text{Al}^{3+}$	Ions positifs d'aluminium
$\text{AlF}_3$	Fluorure d'aluminium
BHP	Béton à haute performance
BT	Brasques traitées
$\text{CaCO}_3$	Carbonate de calcium
$\text{CaO}$	Chaux
$\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6$	Aluminate tricalcique
$\text{Ca}_2\text{SiO}_2$	Silicates dicalcique
$\text{Ca}_3\text{SiO}_3$	Silicates tricalciques
$\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{Fe}_2\text{O}_{10}$	Aluminoferrite de calcium
$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{FeO}_3$	Aluminoferrite tétracalcique
$\text{CaF}_2$	Fluorure de calcium
$\text{CaS}$	Sulfate de calcium
$\text{CaSO}_4$	Gypse
CDW	Déchets de construction et de démolition
CH	Hydroxyde de calcium
CIRAIG	Centre international de référence sur le cycle des produits, procédés et services
$\text{CO}_2$	Dioxyde de carbone
CPHS	Ciment Portland résistant aux sulfates
C-S-H	Hydrate de silicate de calcium ou Calcium Silicate Hydrate
CV	Cendre volante
E/ C	Rapport Eau sur Ciment
ÉICV	Évaluation des impacts du cycle de vie
EoL	Évaluations de l'alternative de fin de vie

## XXII

ÉTS	École de technologie supérieure
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Oxyde de Fer III
Fe <sup>3+</sup>	Ions positifs de Fer
FeO	Oxyde de fer
FeS	Sulfate de fer
GGBS	Laitier de haut fourneau granulé au sol
GP	Béton de poudre de verre
Hz	Unité pour la fréquence dans le Système International d'unités (SI)
ICV	Inventaire du cycle de vie
kgCO <sub>2</sub> eq	Kilogramme d'équivalent dioxyde de carbone
KN	Kilo newton
kg Fe-Eq	Kilogramme de fer équivalent
kN/S	Kilo newton par seconde
kg 1,4 DCB	Kilogramme de 1,4 de Dichlorobenzène
kg oil-Eq	Kilogramme de pétrole équivalent
K <sub>2</sub> O	Oxyde potassium
LCLL Ash	Brasques traitées
LR	LaRonde
LZ5	LaRonde zone 5
MCA	Matériaux cimentaires alternatifs
MgO	Oxyde de Magnésium
Mg <sup>2+</sup>	Ions positifs de magnésium
m <sup>2</sup>	Mètre carré
MnS	Sulfate de Manganèse
kg U235-Eq	kg d'uranium 235 (U <sup>235</sup> ) équivalent
NaF	Fluorure de sodium
Na <sub>2</sub> O	Oxyde de Sodium
PL	Paille de laminage
Qz	Quartz
R <sub>c</sub>	Résistance à la compression

RM	Résidus miniers
RO	Matières organiques respiratoires
RPC	Remblai en pâte cimenté
S	Taux d'affaissement
SDBR	Sable de démolition de béton concassé
SNBR	Sable de démolition de brique concassée
SN	Sable naturel
SiO <sub>2</sub>	Quartz
SF	Fumée de silice
T	Temps d'affaissement
UE	Union Européenne
UF	Unité fonctionnelle
UQAT	Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue
UVED	Université Virtuelle Environnement Et Développement Durable
Watts	Unité de puissance ou de flux radiant dans le Système International d'unités (SI)
$\sigma_c$	Résistance à la compression en Méga Pascal (MPa)





## INTRODUCTION

Le béton de ciment est le matériau de construction le plus utilisé dans le monde du fait de sa durabilité et de sa résistance. En raison de son utilisation à grande échelle, la production de ciments entraîne des émissions importantes de gaz à effet de serre (Milot, 2013), de poussières et de particules (Penrose, 2014). Ainsi, pour limiter ces problèmes, les chercheurs ont suggéré d'utiliser des ajouts cimentaires pour permettre de réduire les émissions de gaz à effet de serre ou GES (Gaz à Effet de Serre). Aujourd'hui, de nouveaux ajouts cimentaires sont générés (ou produits) par certaines industries qui cherchent à valoriser leurs déchets industriels. Ces déchets, une fois traités, sont utilisés dans la production d'autres matériaux pour réduire les émissions nuisibles à l'environnement. Parmi les déchets industriels, il y a les brasques usées qui sont des matières dangereuses provenant du débrasquage des cuves usées. Les brasques usées sont des déchets industriels dangereux à cause de leurs quantités en cyanure, en fluorure et leur réactivité à l'eau provoquant des gaz explosifs (L. Birry, Leclerc, & Poirier, 2016). Pour utiliser les brasques usées comme matériaux cimentaires supplémentaires, Rio Tinto propose de traiter la fraction réfractaire du revêtement des cuves usées grâce au procédé LCLL (Low-Caustic Leaching and Liming) afin de produire un matériau inerte appelé brasque traitée, ou SPL traité (Treated Spent Pot Lining). Afin de trouver de nouveaux ajouts cimentaires, des travaux de recherche basés sur les brasques traitées ont été récemment conduits à l'école de technologie supérieure en collaboration avec Rio Tinto (Brial, Ouellet-Plamondon, Tran, Conciatori, & Sorelli, 2020). Ces travaux ont montré que le LCLL Ash peut être valorisé comme ajout cimentaire dans la production de béton s'il est calciné à une haute température comprise entre 800 et 1000 °C (Brial, Tran, Sorelli, Conciatori, & Ouellet-Plamondon, 2021). Le LCLL Ash calciné a montré des propriétés de réactions similaires à celles d'une argile calcinée (Brial et al. 2021). La mine LaRonde, située dans la région de l'Abitibi au nord-ouest du Québec, exploitée par Agnico Eagle Limited, veut produire des matériaux de construction et des remblais miniers fabriqués avec des déchets industriels. Cette mine veut réaliser des productions de matériaux de construction et miniers de la manière la plus économique possible en utilisant les brasques traitées comme ajout cimentaire. Pour valoriser les brasques traitées, deux types d'analyses sont effectuées dans le cadre de ce projet de recherche. La première

analyse consiste à réaliser une analyse de cycle de vie afin d'évaluer les impacts environnementaux. La deuxième analyse consiste à utiliser les brasques traitées pour la conception d'échantillons de béton et de remblai en pâte cimenté, en remplacement d'une certaine proportion du ciment afin de déterminer leurs performances mécaniques. En plus de l'utilisation des brasques traitées, l'utilisation de la cendre volante comme ajout cimentaire dans les du béton est aussi étudiée au niveau de l'analyse de cycle de vie. L'utilisation des cendres volantes a pour objectif de comparer les impacts environnementaux des bétons fabriqués avec la brasque traitée et ceux fabriqués avec des brasques traitées calcinées. Tous les essais au laboratoire de ce mémoire sont effectués au laboratoire de l'ÉTS. Pour la fabrication du remblai en pâte cimenté, les résidus miniers proviennent de la mine LaRonde, au Canada, et les cendres volantes proviennent de l'entreprise ProAsh, aux États-Unis.

## **0.1 Les objectifs de l'étude**

L'objectif principal de cette recherche est d'évaluer le potentiel de valorisation des brasques traitées environnementalement (études d'analyses de cycle de vie) et techniquement (études des résistances mécaniques du remblai en pâte cimenté et du béton).

Pour réaliser cet objectif principal, deux objectifs spécifiques ont été définis :

- **Objectif spécifique 1** : Effectuer l'analyse de cycle de vie de béton avec différents substituts au ciment, avec :
  - Des brasques traitées sans calcination et avec calcination;
  - De la cendre volante.
- **Objectif spécifique 2** : Déterminer les performances mécaniques de :
  - Béton (avec ou sans brasques traitées/cendres volantes) ;
  - Remblai minier (avec ou sans des brasques traitées).

## **0.2 Contributions et limitation du mémoire**

Les travaux réalisés au cours de ce projet font partie des premières étapes en vue de valider les performances techniques et environnementales des brasques traitées dans les fabrications du béton et du remblai en pâte cimenté. L'utilisation des brasques traitées dans la fabrication

du béton comme substitut d'un certain pourcentage de ciment permettra de réduire la consommation de ce dernier. L'industrie du ciment représente à lui seul environ 3,8 % et 5 % des émissions totales de gaz à effet de serre et des émissions mondiales de CO<sub>2</sub> respectivement (Barcelo, Kline, Walenta, & Gartner, 2014). Ainsi, l'utilisation de substitut doit permettre de réduire cet impact environnemental. Ce mémoire permettra également aux sociétés minières d'utiliser avantageusement les brasques traitées afin de les utiliser en les substituant au ciment dans la fabrication du remblai en pâte cimenté. Cela réduira les quantités des résidus stockés à la surface des sites miniers et utilisés comme composants principaux dans la recette du remblai minier. Ce travail est réalisé dans la perspective de s'assurer techniquement que le béton et le remblai minier fabriqués avec les brasques traitées présentent des propriétés mécaniques qui répondent à la norme de conception canadienne CSA (Canadian Standards Association) des matériaux. D'autres validations sur l'utilisation du LCLL Ash sont aussi en cours. Les limitations du mémoire sont au niveau des procédés utilisés dans l'analyse de cycle de vie. Le LCLL Ash étant considéré comme un ajout cimentaire dans cette étude et n'ayant pas encore été normé, le béton fabriqué avec ce dernier a été comparé uniquement avec le béton fabriqué avec de la cendre volante. Le mémoire utilise des données approximatives de certains processus tels que la calcination, les distances de transport selon les hypothèses établies. Ces hypothèses peuvent être changées par des analystes dans d'autres études.

### **0.3 Structure du rapport**

Ce document basé sur la valorisation des brasques traitées est composé de trois chapitres. Le chapitre I présente une revue bibliographique basée sur des recherches effectuées par différents chercheurs sur l'analyse de cycle de vie, le béton et le remblai en pâte cimenté. Le chapitre II présente le matériel utilisé, la méthodologie adaptée pour réaliser les différents travaux au cours de l'étude. Le chapitre III présente les mesures de résistances à la compression du remblai en pâte cimenté fabriqué au laboratoire et les résultats basés sur l'analyse de cycle de vie des bétons fabriqués avec du LCLL Ash, du LCLL Ash calciné et de la cendre volante, la validation des performances techniques du béton. Le mémoire se termine avec une conclusion qui fait le bilan des différents résultats obtenus ainsi que les objectifs spécifiques réalisés

pour atteindre l'objectif principal de ce mémoire et des recommandations pour les travaux à réaliser dans le futur.

## **CHAPITRE 1**

### **REVUE DE LA LITTÉRATURE**

Ce chapitre présente les résultats des synthèses bibliographiques sur les recherches documentaires au niveau des bases de données comme google scholar, web of science, et Scopus. Cette section du mémoire apporte les résumés des études réalisées par les scientifiques sur les brasques traitées, le béton de ciment, les remblais miniers et les étapes de l'évaluation des impacts environnementaux d'un produit grâce à son étude d'analyse de cycle de vie.

#### **1.1 Les brasques traitées**

L'utilisation des ajouts cimentaires dans la fabrication de béton est devenue une pratique courante. Ces différentes utilisations des ajouts cimentaires dans le béton sont assez documentées dans la littérature de nos jours. En raison de l'emploi des ajouts cimentaires dans les productions d'autres matériaux, les industries des matériaux de construction pensent à les fabriquer de la manière la plus environnementale et économique que possible. Certaines compagnies, comme Rio Tinto, cherchent à fabriquer de nouveaux matériaux à partir des déchets industriels en tenant compte des critères environnementaux. L'objectif de Rio Tinto est de valoriser les brasques traitées en les utilisant comme ajouts cimentaires dans la fabrication des matériaux de construction. L'entreprise Rio Tinto fait aujourd'hui la transformation de ces déchets issus de la production de l'aluminium primaire appelés brasques usées en brasques traitées. À ce jour, la documentation sur l'utilisation des brasques traitées dans le béton est peu présente dans la littérature. Les recherches réalisées lors de ce travail, l'évaluation environnementale et comportementale des brasques traitées dans les fabrications du béton et du remblai en pâte cimenté pourront alimenter ce sujet.

##### **1.1.1 Le Spent Pot Lining (SPL)**

Le Spent Pot Lining, SPL, ou encore la brasque usée est un déchet solide généré lors de la production d'aluminium primaire issu du revêtement de briques réfractaires et des blocs de carbone des cuves d'électrolyse utilisées pour la production de l'aluminium

(L. Birry et al., 2016). C'est une matière dangereuse en raison de ses fluorures et cyanures lixiviables. Le SPL est un déchet qui contient de l'aluminium métallique, du sodium métallique, du carbone, des fluorures, des carbures, des nitrures, de la silice et des cyanures dans la première et la deuxième coupe (Øye, 2017). La densité du SPL est comprise entre 1800 et 2200 kg/m<sup>3</sup> et sa résistance à la compression moyenne est de 20 à 30 MPa (IAI, 2018). Selon le type de cathodes utilisées, sa résistance à la compression maximale est environ 50 MPa. En 1998, Richman a expliqué un schéma montrant la composition globale du SPL (Rickman, 1988) (Figure 1.1). Au fur et à mesure que le temps passe, certains composés chimiques se lessivent et la paroi s'use. Après cette usure, il se produit une rupture du revêtement en deux coupes distinctes (Øye, 2017). C'est un mélange de matériaux issus de revêtement de cuve qui est composé de deux couches (réfractaire et carboné). La première couche est un revêtement en carbone et la deuxième couche est un revêtement réfractaire. La brasque usée (SPL) se compose de quatre composants (Rickman, 1988) (Figure 1.1).

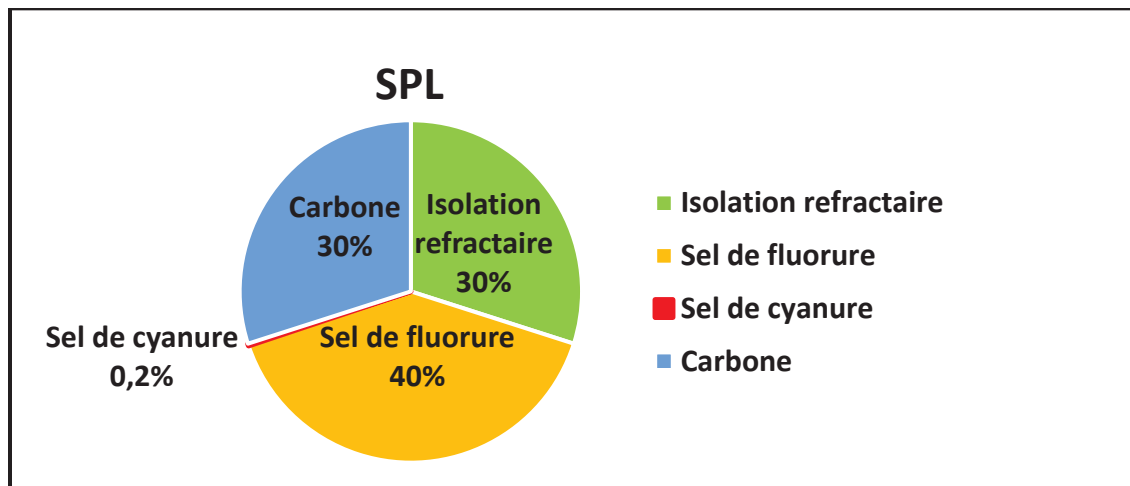


Figure 1.1 Composition moyenne de la brasque usée, tirée de Rickman (1988, p.735).

Le SPL est un produit réactif à l'eau, corrosif avec un pH élevé dû à la présence de métaux alcalins et d'oxydes (IAI, 2018). Cependant, sa réaction avec de l'eau peut amener une production des gaz explosifs. En outre, ces différents composés nocifs présentent des impacts sur l'environnement et la santé humaine. Toutes ces réactions chimiques, ainsi que la présence

des différents composés chimiques, induisent que le SPL est un matériau qui doit être traité en conséquence avant d'être utilisé.

### **1.1.2 Le traitement des brasques**

Les déchets représentent une charge économique pour la société parce que les travaux effectués pour créer les infrastructures pour leur collecte, leur tri et leur recyclage coûtent cher et consomment beaucoup d'énergie. Leur quantité doit être considérée pour les vendre sur le marché des matériaux. Les conséquences de la mauvaise gestion des déchets industriels amènent des impacts sur la qualité des écosystèmes et affectent la santé humaine. Dans un contexte de développement durable, les chercheurs et les industries effectuent des recherches encourager l'utilisation de ces déchets comme de nouvelles ressources dans les fabrications des matériaux de construction. Ces recherches visent à proposer des solutions adéquates de leur utilisation et aussi des moyens de traitement appropriés pour avoir du SPL traité. Certains chercheurs affirment qu'il existe de bonnes solutions pour réutiliser ou faire traiter le SPL (Befesa, 2019; Broek & Øye, 2018; Øye, 2017). Les méthodes de détoxification et de traitement du SPL sont connues au niveau des processus pyrométallurgiques, et hydrométallurgiques (Øye, 2017). Le traitement pyrométallurgique du SPL a été démontré par Reynolds qui a mélangé le SPL avec du calcaire et du silicate métallique afin de convertir le fluorure en  $\text{CaF}_2$  de la coupe de réfractaire. Les minéraux contenant du fluorure dont les scories sont déjà refroidies avec du lait de chaux servent à stabiliser le fluorure (Øye, 2017). Reynolds a mis en place un procédé de détoxification dans lequel il a mélangé le SPL présélectionné, de calcaire et un agent anti-agglomération qui est calciné dans un four rotatif utilisant du gaz naturel comme source de chaleur. L'objectif de Reynolds était que la chaux ( $\text{CaO}$ ) convertisse le fluorure de sodium ( $\text{NaF}$ ) et le fluorure d'aluminium ( $\text{AlF}_3$ ) en fluorure de calcium ( $\text{CaF}_2$ ) déjà moins soluble. Les cyanures sont détruits par le procédé dans un four rotatif à des températures comprises entre 550 et 800 °C pendant 90 minutes. Le test avait utilisé une seule lixiviation avec de l'acide acétique. Les résultats ont montré une faible lixiviation irréaliste en raison du tamponnage du SPL alcalin. À Melbourne, en Australie, la compagnie Regain Materials a développé une solution pour la destruction du cyanure.

Le cyanure est détruit grâce à un traitement thermique en mélangeant et homogénéisant la charge d'alimentation (Broek & Øye, 2018). La compagnie Befesa, propriétaire des compagnies de co-traitement du SPL en Allemagne, au Royaume-Uni et en Espagne, propose de traiter chimiquement le SPL avec des scories salines (Broek & Øye, 2018; Pawlek, 2012). Befesa a d'abord traité des scories salées de l'industrie de l'aluminium secondaire (Veye, 2018). Elle a ensuite mélangé trois parties de scories salines et une partie de SPL et les a ajustés. Ce mélange de scories salines avec du SPL apporte une détoxification et tous les cyanures ont été détruits avec les produits chimiques. Les solides sont ensuite filtrés et séchés pour être utilisés dans les fabrications de ciment, de la céramique, de la laine minérale des travaux publics et de l'acier (Broek & Øye, 2018). L'usine de traitement de SPL située à la Jonquière dans la province québécoise a été construite en 2008 par Rio Tinto. Cette usine a une capacité de traitement de 80 kt tonnes de brasques usées par an (L. Birry, S. Leclerc, and S. Poirier, 2016). Le traitement du SPL se fait à l'aide d'un procédé hydrométallurgique appelé Low-Caustic Leaching and Liming (LCLL) process en anglais, c'est-à-dire une lixiviation à bas caustique et ajout de chaux (L. Birry, S. Leclerc, and S. Poirier, 2016) (Figure 1.2). Le procédé de traitement du SPL est constitué de deux parties, une partie sèche et une partie humide. La partie sèche de la brasque usée est broyée en poudre afin d'obtenir des particules inférieures à 300 µm. Le traitement de la partie humide commence par un processus de lixiviation à bas caustique par différents lavages de brasque. À l'aide de ces étapes de lixiviation, les résidus solides inertes sont séparés de la partie humide contenant des fluorures et des cyanures solubles. Ces solides inertes sont appelés les brasques traitées. Cette méthode de traitement du SPL (hydrométallurgie), fait qu'aujourd'hui Rio Tinto cherche à les valoriser afin de les utiliser dans la fabrication d'autres matériaux. L'objectif de ce mémoire, porte sur la recherche des méthodes d'évaluations environnementales et techniques novatrices pour valoriser les brasques traitées en les utilisant dans les fabrications du béton et du remblai en pâte cimenté d'un côté et aussi alimenter la littérature, en raison du peu d'études existantes de l'autre côté.



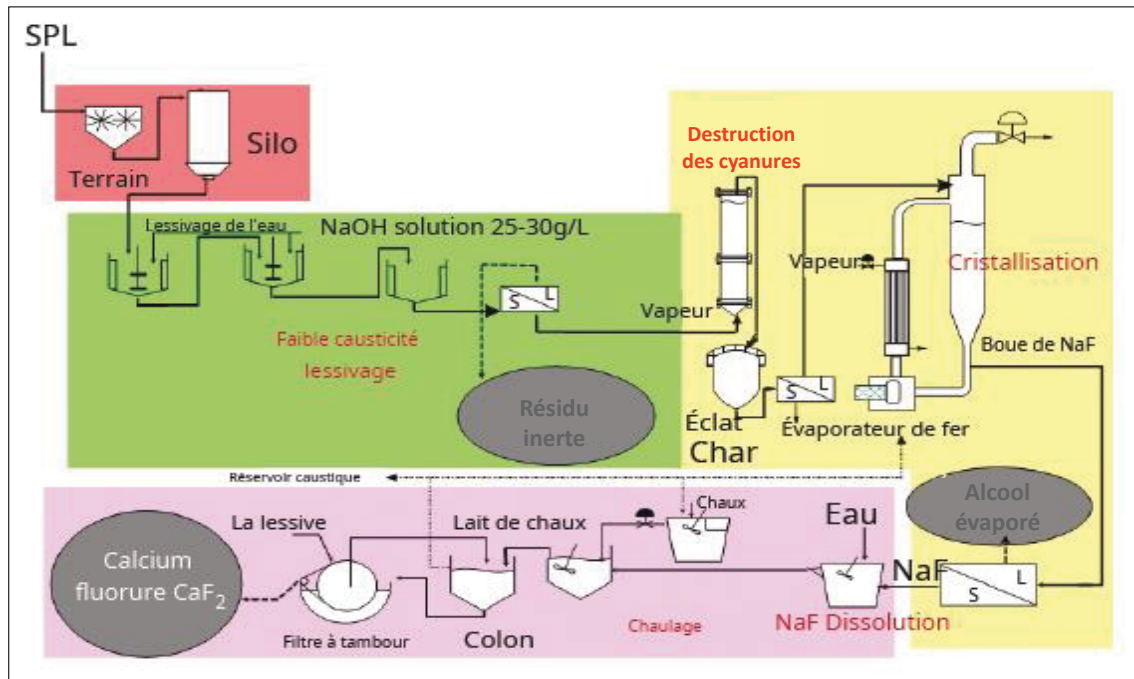


Figure 1.2 Diagramme de flux du procédé de LCLL, tiré de Birry, Leclerc and Poirier (2016, p. 705-712).

## 1.2 Le béton de ciment

Le béton de ciment est un matériau de construction aggloméré composé de sable, d'eau, de liants (ciment portland et ajouts cimentaires) et de granulats (gros et fins) pour former une pâte. Sa formulation est réalisée dans une bétonnière et tient compte des caractéristiques des constituants.

### 1.2.1 La fabrication du béton

La fabrication du béton se fait dans une bétonnière à tambour rotatif en mélangeant les différents composants (gravier, sable, ciment, eau et liants). Le processus de fabrication consiste à mettre d'abord les graviers dans la bétonnière, avec la moitié de l'eau prévue pour toute la gâchée. Après un temps de malaxage des graviers avec de l'eau, le sable est ensuite ajouté. Après cette étape, le ciment est prémélangé avec des ajouts cimentaires (laitiers, ou cendres volantes, ou fumée de silice ou fillers calcaires) et ajoutés sur les autres composants dans la bétonnière. La dernière étape correspond à l'ajout des adjuvants avec l'autre moitié

de l'eau afin d'avoir une pâte homogène. Ces adjuvants servent à augmenter la plasticité et faciliter la mise en place du béton (Guiraud, 2018). Le béton est le deuxième produit le plus consommé au monde après la consommation de l'eau, avec environ 3,5 à 5,3 tonnes de béton par habitant et par an (IEA, 2020). Il est couramment utilisé dans le domaine de la construction, sa production et sa consommation engendrent des impacts environnementaux considérables.

### **1.2.2 L'importance de l'utilisation des matériaux cimentaires supplémentaires dans le béton**

L'utilisation des ajouts cimentaires qui génèrent moins d'impacts utilisés dans la fabrication du béton permet de réduire les émissions de gaz à effet de serre dû majoritairement à l'emploi du ciment et l'épuisement des ressources environnementales qui nécessite l'extraction des matières premières (Deschamps, Simon, Tagnit-Hamou, & Amor, 2018). Cette extraction provoque des dommages sur la santé humaine, la dégradation des écosystèmes, la contamination du sol, de l'eau et de l'air (Corominas et al., 2020). Pour pallier ces problèmes environnementaux, certains auteurs ont réalisé des études de viabilités environnementales et techniques. L'objectif de ces études est de trouver d'une part des solutions durables de réductions du changement climatique et de consommations du ciment et des ressources au moment de la fabrication du béton. D'autre part, ces études de la littérature visent à améliorer les performances mécaniques de bétons. En 2015, Alatshan et al. ont analysé l'impact de l'utilisation des granulats dans la production du béton en remplaçant le granulat naturel par le granulat recyclé en différents pourcentages de substitution. Les résultats ont montré que la substitution de 30 % des granulats recyclés aux granulats naturels dans le mélange de béton a donné les meilleurs résultats pour la résistance à la compression du béton. Les auteurs ont aussi analysé l'impact de la substitution de la poudre de paille de laminage (PL) en divers pourcentages au ciment dans la production du béton (Alatshan, Altomate, & Rezgui, 2015). Le remplacement d'un certain pourcentage de ciment par de la PL dans le béton contenant déjà du granulat recyclé n'apporte pas une réduction de sa résistance à la compression.

L'effet de la PL donne de meilleurs résultats lorsqu'elle est en même temps utilisée dans la recette du béton avec le ciment, les agrégats recyclés, l'eau et le sable (Alatshan et al., 2015). En effet, remplacer 6 % de ciment par de la PL, et en intégrant 30 % de granulats recyclés

pour remplacer les granulats naturels a permis d'obtenir la meilleure résistance à la flexion des différents bétons fabriqués avec ces matériaux recyclés. À travers ces résultats, les auteurs recommandent l'utilisation des granulats recyclés dans les bétons ordinaires pour diminuer l'utilisation du granulat naturel et favoriser l'emploi des déchets de construction dans le béton. En 2009, Benaichi a mené une étude basée sur l'utilisation des déchets de démolition (béton et brique) comme agrégats fins (sable) dans la fabrication du mortier et du béton hydraulique (Benaichi, 2009). L'auteur a utilisé des déchets de béton et de briques de démolition. Avec les taux de substitution de granulats recyclés de 0, 20, 30, 50, 70 %, les résultats ont démontré qu'il y a une diminution de la résistance à la compression soit environ 8 à 27 % pour les bétons à base de déchets de béton et de 14 à 33 % pour les bétons à base de briques concassées de démolition. Aussi, avec 50 % de béton concassé dans la fabrication du béton et des incorporations de superplastifiants et de la fumée de silice, il est possible de produire du béton avec une bonne résistance mécanique (Benaichi, 2009). Le béton fabriqué avec 50 % de sable, issu de la démolition de déchets de béton, présente un meilleur module d'élasticité dû à la forte adhérence entre la pâte de ciment et les agrégats. Le béton fabriqué avec des matériaux recyclés absorbe beaucoup d'eau par rapport au béton ordinaire, car leurs perméabilités peuvent atteindre un coefficient de perméabilité de  $3.4 \cdot 10^{-15}$  m/s pour le béton conventionnel et  $3.02 \cdot 10^{-14}$  m/s pour le béton avec des matériaux recyclés (Benaichi, 2009). Le pourcentage d'absorption d'eau par immersion est de 4,6 % pour le béton fabriqué avec du béton démolé, 5,7 % pour le béton de brique concassé par rapport à 2 % celui du béton ordinaire (Benaichi, 2009). En 2019, Colangelo et al. ont confirmé que les déchets de construction et de démolition (C&DW) constituent les plus grands flux de déchets de l'Union européenne (UE) et leur objectif était de déterminer les impacts environnementaux en réalisant une ACV comparative de différents types de béton. Les études d'ACV réalisées avec le logiciel Simapro ont été effectuées du berceau à la tombe. Les résultats ont été trouvés grâce à la base de données Ecoivent3.3 et la méthode d'impact choisie est la méthode Impact 2002+. Les auteurs ont ensuite réalisé des ACV du béton fabriqué avec des granulats recyclés dans le but de connaître les impacts environnementaux de ce type de béton en Europe (Colangelo, Navarro, Farina, & Petrillo, 2020). Pour l'analyse comparative, l'étude a considéré quatre scénarios de mélanges

de béton avec du ciment Portland, quatre scénarios de mélanges de béton avec des granulats recyclés et quatre scénarios de mélanges de géopolymères différents.

D'un point de vue impact environnemental, les résultats ont montré que le meilleur scénario est celui où le béton est fabriqué avec 25 % d'agrégats recyclés par rapport aux mélanges de bétons avec du ciment Portland et des bétons avec des géopolymères. L'utilisation des agrégats recyclés pour la production du béton génère moins d'impacts environnementaux. En 2018, Deschamps et al., ont réalisé une ACV basée sur l'utilisation d'une fine poudre de verre provenant des déchets de verre mélangés comme matériaux cimentaires alternatifs (MCA) dans la fabrication du béton (Deschamps et al., 2018). Deux scénarios ont été comparés par les auteurs, à savoir un scénario d'un trottoir en béton conventionnel, appelé scénario BAU (business as usual) et un scénario d'un trottoir en béton de poudre de verre, appelé scénario GP ou béton GP. Les résultats ont montré que le scénario GP présente une réduction des émissions de gaz à effet de serre de 20 % (en CO<sub>2</sub>eq) par rapport au scénario BAU donc le scénario GP a un impact environnemental plus faible que le scénario BAU pour chaque indicateur médian. Le réchauffement climatique ou GW (Global warming) est l'indicateur qui présente la plus grande réduction de la charge environnementale, soit environ 20 % tandis que la plus faible réduction est marquée par les matières organiques respiratoires (RO), soit 3 %. En 2011, Geryville et al. ont présenté une étude basée sur l'utilisation des déchets industriels pour fabriquer des pouzzolanes artificielles qui sont des matières composées de silice, d'aluminium et d'oxyde de fer et se mélange facilement avec de la chaux en présence de l'eau grâce à un traitement thermique (Geryville, Kacimi, Cyr, & Clastres, 2011). L'objectif des auteurs était d'élaborer des écociments par substitution partielle du clinker par des déchets industriels dans le ciment Portland sans affecter les performances du ciment. L'étude a été réalisée en utilisant trois déchets industriels (la boue de forage des puits de pétrole, la boue de traitement de sable du verre et la vase du barrage hydraulique), qui sont composés de silice et/ou d'alumine avec un faible pourcentage de calcaire. Les auteurs ont effectué les analyses à l'aide d'un traitement hydrothermal pour obtenir un certain pourcentage d'hydratation du ciment en formant du silicate de calcium hydraté (C-S-H) (renforcement des propriétés mécaniques du ciment). Après l'activation chimique par le traitement hydrothermal, ces types de déchets obtiennent une grande pouzzolanité qui leur permettra de substituer le ciment Portland

avec un pourcentage allant jusqu'à 50 % de la masse du ciment (Geryville et al., 2011). Cela a permis non seulement de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> liées à la production du ciment Portland, mais aussi de valoriser les déchets industriels. En 2016, Yahia a réalisé une étude basée sur la contribution de la valorisation d'un déchet de cimenterie (ciment hydraté) afin de produire un nouveau ciment. Le but de l'étude était d'introduire des pourcentages de ciment hydraté pour substituer le clinker pour voir l'intérêt sur l'environnement et sur les performances mécaniques du nouveau ciment fabriqué (Yahia, 2016). Le nouveau ciment fabriqué présente de meilleures caractéristiques rhéologiques et mécaniques que celles d'un ciment ordinaire. L'auteur confirme que la fabrication de ce type de ciment permet de réduire la consommation d'énergie, de minimiser l'émission de CO<sub>2</sub> et d'établir une bonne gestion de ce type de déchet (ciment hydraté) pour obtenir un ciment plus économique et écologique (Yahia, 2016). En 2020, Manjunatha et al, ont réalisé une analyse de cycle de vie du béton préparé avec des matériaux durables à base de ciment (Manjunatha, Raju, & Sivapullaiah, 2021). Les auteurs ont mis en place trois scénarios de fabrication du béton, à savoir le béton préparé avec le ciment Portland ou OPC (Ordinary Portland Cement), avec le laitier granulé de haut fourneau broyé (GGBS) et avec le ciment Portland pouzzolanique PPC (Pouzzolanic Portland Cement). Les résultats d'ACV basés sur une comparaison des trois scénarios ont montré que le GGBS et le PPC ont contribué aux réductions de la consommation d'énergie et de grandes quantités de ressources naturelles pour la fabrication du béton. Les auteurs confirment également que les effets sur la santé humaine, la toxicologie marine, l'eutrophisation de l'eau douce peuvent être considérablement réduits en remplaçant un certain pourcentage du ciment par du GGBS et du PPC dans la production du béton. De plus, les utilisations du GGBS et des cendres volantes dans la formulation de liants sont également une autre alternative intéressante pour la préparation du béton.

### **1.3 Le ciment Portland**

Le ciment est l'un des liants hydrauliques le plus utilisé dans la construction. C'est un mélange de calcaire et d'argile comme matières principales qui sont soumises à une cuisson préalable à une température de 1450 °C dans un four rotatif. Le produit obtenu à la sortie du four s'appelle le clinker. Le ciment est ensuite fabriqué en ajoutant au clinker une quantité de gypse (5 %)

afin d'obtenir une poudre fine grise. Il existe plusieurs types de ciment, mais le ciment le plus utilisé est le ciment Portland. Ce type de ciment est composé de 95 % de clinker et au plus 5 % de constituants secondaires dont le gypse. Sa composition et ses propriétés sont déterminées par la norme CSA A3000.

### 1.3.1 Définition

Le ciment Portland est un matériau gris obtenu par la mouture de clinker Portland, de cendres volantes siliceuses et de calcaire ou de laitier. Au Canada, il existe six types de ciments Portland, selon l'association canadienne de normalisation en vertu de la norme A3001 (CAC, 2016; CQ, 2017) :

- Type GU : Ciment à usage général,
- Type MS : Ciment à résistance modérée aux sulfates,
- Type MH : ciment à chaleur d'hydratation modérée,
- Type HE : ciment à haute résistance initiale,
- Type LH : ciment à faible chaleur d'hydratation,
- Type HS : ciment à haute résistance aux sulfates.

Le ciment Portland est un liant hydraulique donc son contact avec de l'eau amène une réaction chimique et un durcissement du mélange. Les types de ciment Portland présentés possèdent chacun leur composition chimique. Cette composition chimique est obtenue grâce à la cuisson du cru de ciment Portland chauffée à une température d'environ 1450 °C. En contact avec de l'eau, des liaisons chimiques sont créées pour former quatre minéraux. Les minéraux obtenus sont l'alite, la bélite, la célite U et la ferrite (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 Composition chimique des phases du ciment Portland tiré du cours 8 de Tikou Belem, Hydratation des ciments et des liants hydrauliques (2014, p.34)

Nom du composant	Formule chimique	Notion cimentaire	% massique des différentes phases
<b>Silicate tricalcique (alite)</b>	$3\text{CaOSiO}_2$	$\text{C}_3\text{S}$	50 à 70 %
<b>Silicate dicalcique (bélite)</b>	$2\text{CaOSiO}_3$	$\text{C}_2\text{S}$	15 à 30 %
<b>Aluminate tricalcique (Célite I)</b>	$3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$	$\text{C}_3\text{A}$	5 à 10 %
<b>Aluminoferrite tétracalcique (célite ou ferrite)</b>	$4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{FeO}_3$	$\text{C}_4\text{AF}$	5 à 15 %
<b>Gypse</b>	$\text{CaSO}_4$	$\text{C-S-H}_2$	2 à 6 %

Le silicate tricalcique (alite) et le silicate dicalcique (bélite) représentent la phase silicatée du ciment Portland. L'aluminate tricalcique (Célite I) et l'aluminoferrite tétracalcique constituent sa phase alumineuse (P-C Aïtcin, 2016). La fabrication du ciment Portland peut varier d'une cimenterie à une autre à cause des caractéristiques du clinker demandées selon les objectifs de l'entreprise.

### 1.3.2 Fabrication

Le ciment Portland est composé chimiquement d'oxydes, à savoir,  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  et  $\text{SO}_3$  (P-C Aïtcin, 2016; Marchon & Flatt, 2016; Ramezani pour, 2014; K. L. Scrivener, Juilland, & Monteiro, 2015). Les différentes étapes de fabrication dans l'ordre sont l'extraction des matières premières, le broyage et la cuisson, ensuite le broyage final du ciment et l'expédition (Figure 1.3).

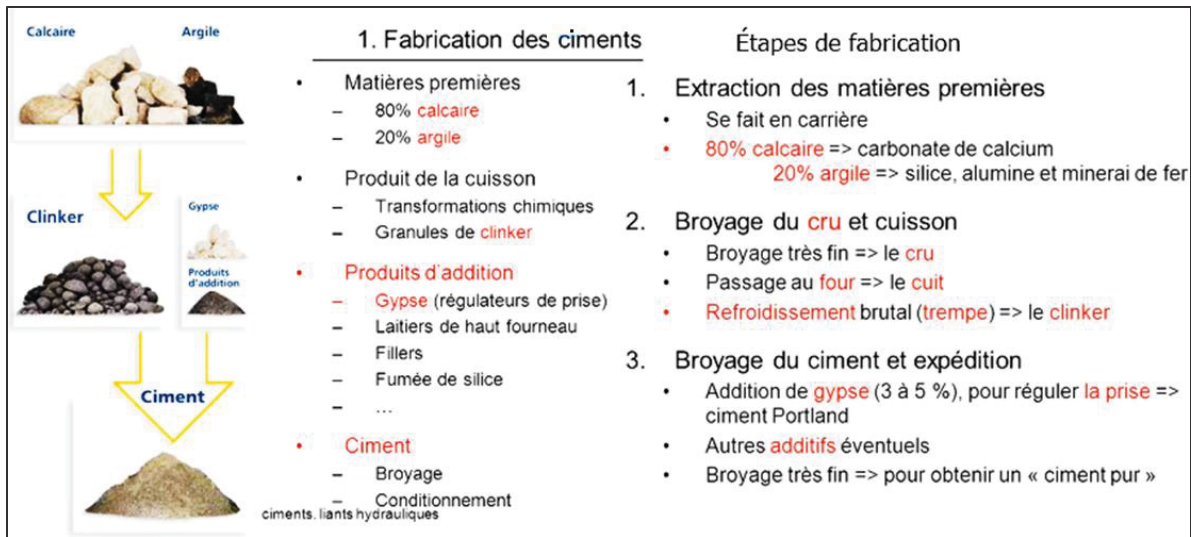


Figure 1.3 Étapes de fabrication du ciment, tirée de cours 3 Adam (2014, p.13)

Les matières premières (calcaire et argile) subissent une cuisson préalable dans un précalcinateur à une température de 700–800 °C. Cette température n'est pas suffisante pour transformer tout le calcaire en chaux, et la poudre crue subira alors une combustion, à une température de 1450 °C dans un four rotatif. Cette calcination amène une transformation chimique de ces matières premières, car le calcaire fournit la chaux, et l'argile fournit principalement la silice ( $\text{SiO}_2$ ), l'alumine  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et l'oxyde de fer  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Pierre-Claude Aïtcin, 2007; Hyvert, 2009). Au cours de cette phase de calcination, les  $\text{C}_3\text{S}$ ,  $\text{C}_2\text{S}$  et la phase interstitielle sont développés. Le produit obtenu à la sortie du four s'appelle le clinker (Figure 1.4). Après cette étape de combustion, le clinker est refroidi à l'air afin de stabiliser les formes hydrauliques du  $\text{C}_3\text{S}$ . Le clinker refroidit donne un matériau qui a perdu ces propriétés hydrauliques rapides (P-C Aïtcin, 2016). La phase interstitielle est obtenue en mélangeant du  $\text{C}_3\text{A}$  et du  $\text{C}_4\text{AF}$  pour obtenir un liquide à 1450°C.



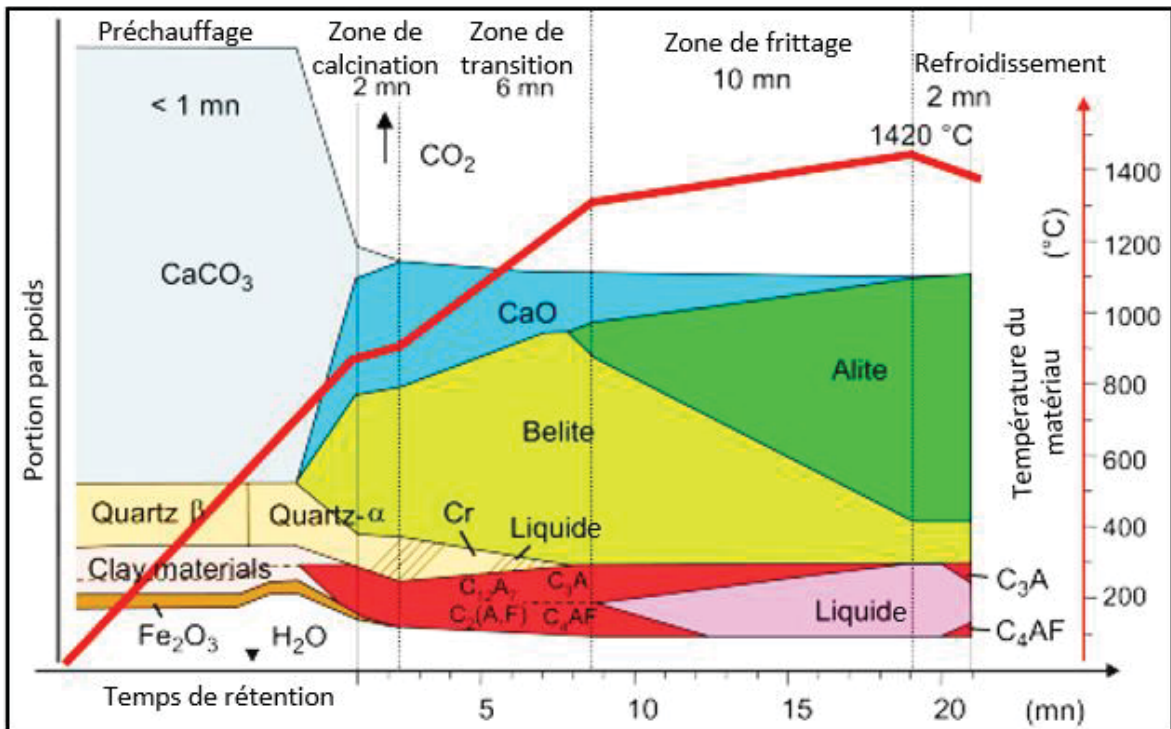


Figure 1.4 Mécanismes de fabrication du clinker du ciment Portland, tirée de Aïtcin (2016, p.1).

Le clinker de ciment Portland est ensuite broyé avec une certaine quantité de gypse (environ 5 %), pour fabriquer du ciment Portland. À part le gypse, il y a aussi d'autres sulfates de calcium qui peuvent être utilisés, à savoir l'anhydrite, l'hémihydrate, le sulfate de calcium synthétique. Il est également possible d'ajouter d'autres additifs comme les cendres volantes, les laitiers, le filler calcaire ou la fumée de silice pour en améliorer ses propriétés mécaniques. Le produit final obtenu est une poudre fine grise appelée le ciment Portland.

### 1.3.3 Hydratation du ciment

L'hydratation du ciment est un processus de dissolution/précipitation c'est-à-dire c'est un processus au cours duquel les composantes du ciment  $C_3S$ ,  $C_2S$  et  $C_3A$  et  $C_4AF$  réagissent en contact avec de l'eau pour former de nouveaux composés insolubles (Souchu, 2009). Ces réactions entraînent la prise et le durcissement progressif du ciment. L'hydratation du ciment nécessite l'usage de quatre phases minérales. La première phase commence par une réaction entre l'eau et le ciment. La réaction des composantes du ciment  $C_3S$  et  $C_3A$  génère les formations de l'ettringite et des CSH (métastables). La deuxième phase est marquée

par le passage des ions calcium, silicate, hydroxyde et sulfate en solution dans l'eau. Une fois l'eau saturée en ions, il y a un début de prise. Les constituants se dissolvent lentement et il y a une augmentation du pH de la solution. La troisième phase représente la période d'accélération. À cause de la hausse de la conductivité électrique de la solution, les concentrations en ion  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{OH}^-$  de la solution deviennent importantes. Cela permet la précipitation de la portlandite suivi d'un mécanisme de dissolution, de nucléation et précipitation des phases formant ainsi les hydrates (ettringite, portlandite, C-S-H). La quatrième phase représente la phase de ralentissement. La couche d'hydrates qui couvrent les grains d'anhydres s'épaississent et l'hydratation continue grâce à la diffusion de l'eau par les pores de gel. C'est au cours de cette période que l'ettringite de type AFt se dissout pour se transformer en type AFm.

#### 1.3.4 Impacts environnementaux

Les émissions liées à la production du ciment peuvent être attribuées à environ 40 % pour le procédé de production et environ 60 % pour la décarbonatation de la roche. La cuisson du calcaire à une certaine température libère du carbone sous forme de  $\text{CO}_2$  (Gauthier, 2018). D'un point de vue impact environnemental, les procédés de fabrication et d'utilisation du ciment engendrent des conséquences sur l'environnement :

- ✓ **La santé humaine** : l'inhalation de fortes concentrations de poussières irrite les voies respiratoires supérieures. L'exposition durant une longue durée a des conséquences majeures sur la peau et les yeux.
- ✓ **Les écosystèmes** : la perturbation de la faune au moment de l'extraction des matières premières à cause des nuisances sonores des équipements d'extractions, de la poussière et des émissions de gaz à effet de serre.
- ✓ **Les ressources** : les exploitations des matériaux composant le ciment amènent un épuisement au niveau des ressources naturelles et une dégradation de la surface terrestre.
- ✓ **Le changement climatique** : La production du clinker génère des gaz à effet de serre, des émissions liées à la production de l'électricité alimentant la cimenterie et des oxydes d'azote ( $\text{NO}_x$ ). Ces oxydes d'azotes contribuent largement à la formation photochimique d'azote troposphérique, de pluies acides. Ces émissions de gaz à effet de serre contribuent

au réchauffement climatique. Au Québec, la plus grande quantité de gaz à effet de serre (CO<sub>2</sub>) a été générée par la cimenterie McInnis en 2020 (1,2 million de tonnes de gaz à effet de serre (GES) soit 1 210 596 tonnes métriques d'équivalents CO<sub>2</sub>) (Lecavalier, 2021). L'entreprise McInnis n'ayant pas encore atteint sa production maximale cette année 2023, les prévisions canadiennes montrent qu'elle devra générer près de 1,76 million de tonnes de GES en 2023 donc une croissance des émissions des gaz à effet de serre. Pour limiter les impacts environnementaux dus à la production du ciment, les scientifiques et chercheurs dans le domaine du béton se mobilisent depuis quelques années pour trouver des solutions plus durables pour sa fabrication afin de limiter les impacts environnementaux.

## 1.4 Les ajouts cimentaires

### 1.4.1 Définition

Les ajouts cimentaires sont des matériaux inorganiques qui contribuent aux propriétés d'un mélange de ciment à l'aide d'une activité hydraulique ou pouzzolanique, ou les deux simultanément (Coussy, 2011). Les types d'ajouts cimentaires sont (P-C Aïtcin, 2016; Diani, 2015) :

- **Les laitiers de haut fourneau** : Ils sont générés par l'industrie sidérurgique, ce sont des produits issus du procédé de fabrication du minerai de fer, de résidu de coke et de calcaire. Ils sont composés de chaux (CaO), de la silice (SiO<sub>2</sub>), et d'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). Ils contiennent aussi de petites quantités de l'oxyde de magnésium (MgO), de l'oxyde de fer (FeO) et des sulfures comme le sulfate de calcium (CaS), le sulfate de manganèse (MnS) ou le sulfate de fer (Befesa) (Kumar et al., 2008). Il existe d'autres types de laitiers comme les laitiers d'aciérie (deuxième fusion du fer), de phosphore ou de cuivre (Kumar et al., 2008; Shi & Qian, 2000).
- **Les pouzzolanes (naturelles ou artificielles)** : ce sont des matériaux siliceux ou silico-alumineux utilisés comme adjuvant de ciment Portland dans le béton ou les mortiers à cause de leurs réactivités chimiques et leurs contenus minéralogiques. Ils sont composés chimiquement à plus de 70 % par les éléments suivants : 15 % d'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), 45 % de silice (SiO<sub>2</sub>) et 15 % d'oxyde de fer (FeO) (Benkaddour, Aoual, & Semcha, 2009).

- **La fumée de silice (silica fume)** : C'est l'un des pouzzolanes artificielles provenant de l'industrie du silicium et du ferrosilicium de couleur blanche ou grise (Khan & Siddique, 2011; Siddique, 2011). Elle a une réaction pouzzolanique comme la cendre volante et réagit avec l'hydroxyde de calcium libéré lors de l'hydratation du ciment et devient du silicate de calcium hydraté (C-S-H) (Manel, 2017).
- **La cendre volante (fly ash)** provient des centrales thermiques au charbon.

Les cendres volantes se classent en trois catégories selon l'Association Canadienne de Normalisation 3001 ou Canadian Standard Association CSA 3001 et l'ASTM C618, les cendres volantes se classent en trois catégories, les classes F, C, et N (ASTM, 2012; CSA, 2018). Les cendres volantes pauvres en calcium ou la classe F (habituellement moins de 10 % de CaO), produits par la combustion d'antracite ou de charbon bitumineux, les cendres volantes riches en calcium ou la classe C, et les pouzzolanes naturelles appelées cendre volante de classe N.

#### 1.4.2 Type de réactivité des ajouts cimentaires

Les ajouts cimentaires sont des liants qui présentent différentes réactions selon leurs compositions chimiques. Ils peuvent avoir une réactivité hydraulique latente, hydraulique, pouzzolanique ou inerte (Benzemmouri, 2021).

Le tableau ci-dessous classifie les ajouts cimentaires selon leurs réactivités (Benzemmouri, 2021).

Tableau 1.2 Classification des liants et des ajouts selon leur réactivité réactivités, tiré de Benzemmouri (2021, p.29)

Type	Réactivité	Matériaux
<b>Hydraulique</b>	Fortement réactif	Ciments spéciaux-chaux hydraulique
<b>Hydraulique latent</b>		Laitier granulé-cendres volantes riche en calcium (calciques)
<b>Pouzzolanique</b>	Fortement réactif	Fumée de silice
	Moyennement réactif	Cendres volantes pauvre en calcium, Pouzzolanes naturelles (verre volcanique, tufs volcaniques, terres à diatomées)
	Faiblement réactif	Scories cristallines
<b>Inerte</b>	Non réactif	Fillers (farine calcaire), fibres, pigments colorants, matières expansives, dispersions synthétique

### 1.4.3 Les avantages de l'utilisation des ajouts cimentaires

Les ajouts cimentaires jouent un rôle important dans la fabrication des matériaux :

- Ils réduisent la consommation de ciment, donc contribuent favorablement à la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> ;
- Ils améliorent leurs imperméabilités, et leurs résistances aux attaques chimiques (Belhocine & Nagoudi, 2014; Mohamed, 2016) ;
- Ils améliorent la résistance à la fissuration en permettant une faible chaleur d'hydratation des ciments (Belhocine & Nagoudi, 2014) ;
- D'un point de vue économique, ils diminuent le coût de la production du matériau rentable lorsqu'ils remplacent une partie du ciment dans la recette, car le ciment est le composant le plus onéreux dans la production du béton.

### 1.5 Les agrégats

Ce sont des matériaux sous forme de grains minéraux qui peuvent être naturels ou artificiels et dont les dimensions varient entre 0 et 125mm (Giraud, 2018a). Les agrégats sont utilisés pour la fabrication des bétons, des mortiers, des ballasts des voies ferrées, des couches de base et des roulements de chaussées. Leurs utilisations se font selon leurs caractéristiques et leurs granulométries pour fabriquer un matériau. D'un point de vue granulométrie, un agrégat est

désigné par sa classe granulaire qui est exprimée en d/D ou en 0/D avec d le diamètre minimum et D le diamètre maximum. Les types d'agrégats les plus utilisés sont dans le (Tableau 1.3) (Giraud, 2018a).

Tableau 1.3 Les agrégats et leurs caractéristiques

Types de granulat	Dimensions et caractéristiques
Les fillers	0/D avec $D \leq 2$ mm
Les sables	0/D avec $D \leq 4$ mm
Les graves	0/D avec $D \leq 6,3$ mm
Les gravillons	d/D avec $d \geq 2$ mm et $D \leq 63$ mm
Les ballasts	d/D avec $d \geq 31,5$ mm et $D \leq 50$ ou 63 mm

Les graviers fins ( $D_{max} < 5$  mm) et grossiers ( $D_{max} > 5$  mm) sont les agrégats les plus utilisés dans la fabrication du béton. Ils jouent un rôle important au niveau de ses propriétés mécaniques.

## 1.6 L'eau

L'eau utilisée pour la fabrication du béton, aussi appelée eau de gâchage, est une eau ajoutée au moment du mélange des composants du béton. Elle permet au béton une bonne plasticité (ouvrabilité) et facilite les réactions d'hydratation du ciment qui conduisent à la prise et au durcissement. Cependant, son usage est mesuré afin d'éviter une diminution de la résistance et de la durabilité du béton. L'eau de gâchage ne doit pas contenir de matières organiques ni d'alcalis. Les types d'eau de gâchage les plus utilisées sont l'eau du robinet et l'eau issue du lavage du béton. Dans la fabrication du béton, le dosage de l'eau est très important, il est alors mesuré à l'aide du paramètre eau/ciment (e/c) ou eau/liant (e/l). Ce paramètre joue un rôle déterminant au niveau de la porosité, de la résistance et de la durabilité du béton. En général, le rapport e/c est compris entre 0,4 et 0,6 et l'hydratation du ciment nécessite 20 à 25 % d'eau de la quantité de ciment en masse (Infociments, 2018a). L'eau restante assure la maniabilité du béton frais (Infociments, 2018b). La résistance à la compression peut être mesurée selon la norme CSA A23.2-9C en fonction du rapport e/c (CSA, 2009b; Laldji, 2015) (Figure 1.5).

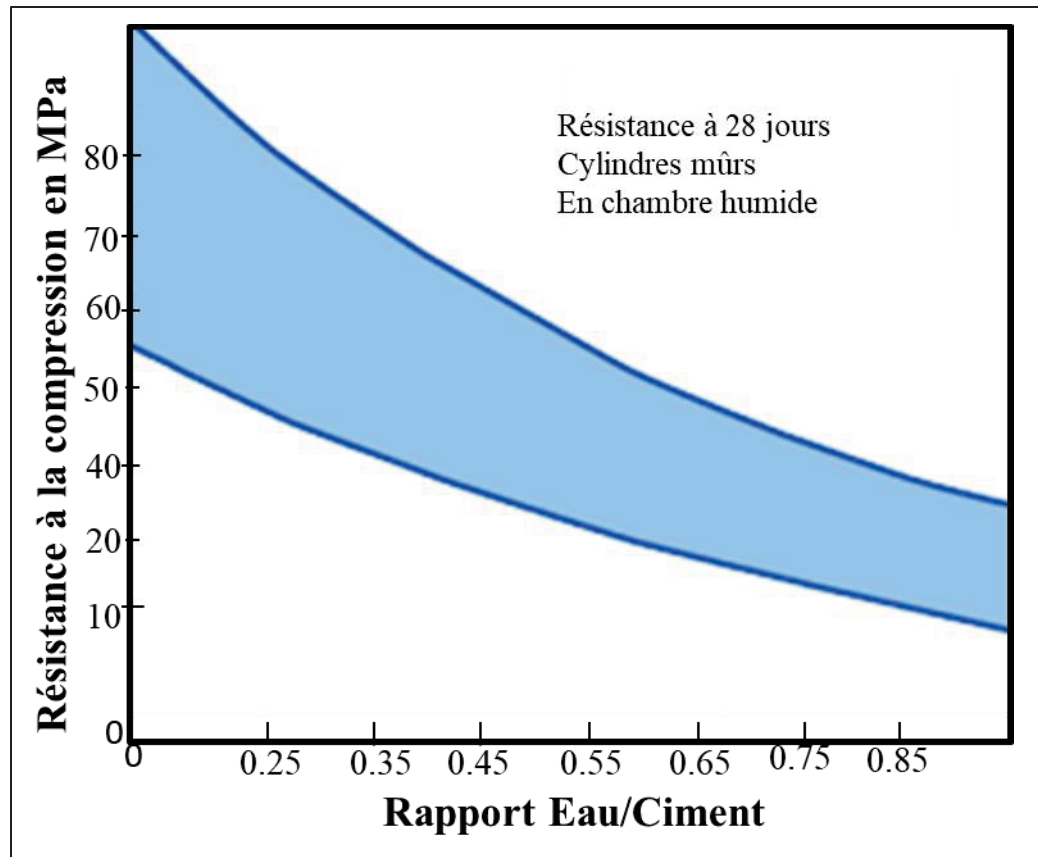


Figure 1.5 Valeur du rapport eau/ciment en fonction de la résistance à la compression mesurée selon la norme CAN/CSA A23.2-9C, tirée du cours les caractéristiques fondamentales du béton par S. Laldji (2015, p.17)

## 1.7 Les adjuvants

Les adjuvants sont des produits en poudre ou liquides qui améliorent les propriétés des mortiers, des bétons et des enduits. Dans la fabrication des matériaux, leurs ajouts se font soit au début, en cours ou à la fin de l'étape de production. Il existe plusieurs types d'adjuvants et chaque adjuvant joue un rôle important dans la fabrication du béton des matériaux. Les adjuvants les plus utilisés sont (Giraud, 2018b) :

- ✓ Les plastifiants : Ils améliorent principalement l'ouvrabilité;
- ✓ Les accélérateurs de prise: Ils accélèrent la prise et compensent le retard de la prise par temps de froid;
- ✓ Les retardateurs de prise: Ils retardent l'accélération du temps de prise par temps de froid et diminuent le risque de raidissement du matériau;

- ✓ Les durcisseurs : Ils améliorent la résistance;
- ✓ Les entraîneurs d'air : Ils protègent le béton des cycles de gel-dégel en favorisant un réseau de bulles d'air;
- ✓ Les anti-dessiccations : Ils protègent le matériau contre l'évaporation rapide de l'eau (dessiccation).

Les adjuvants peuvent aussi avoir des inconvénients d'un point de vue économique : les accélérateurs, les plastifiants et les retardateurs lorsqu'ils sont utilisés dans la fabrication du béton peuvent augmenter le prix de ce dernier.

## 1.8 Les remblais miniers

### 1.8.1 Définitions et rôle dans l'industrie minière

Les remblais miniers sont des matériaux utilisés pour remplir le vide créé par un chantier d'exploitation. Le processus de remblayage consiste à envoyer du matériel de remblayage au niveau de la zone exploitée à partir de la surface jusqu'au plancher d'exploitation. La zone remplie par du matériau devient la nouvelle plateforme de travail pour la prochaine zone d'extraction (Figure 1.6). Cela permet de mettre en place en toute sécurité la zone suivante à exploiter. Le type de remblai est ainsi déterminé en fonction des méthodes d'extractions choisies pour cette zone.

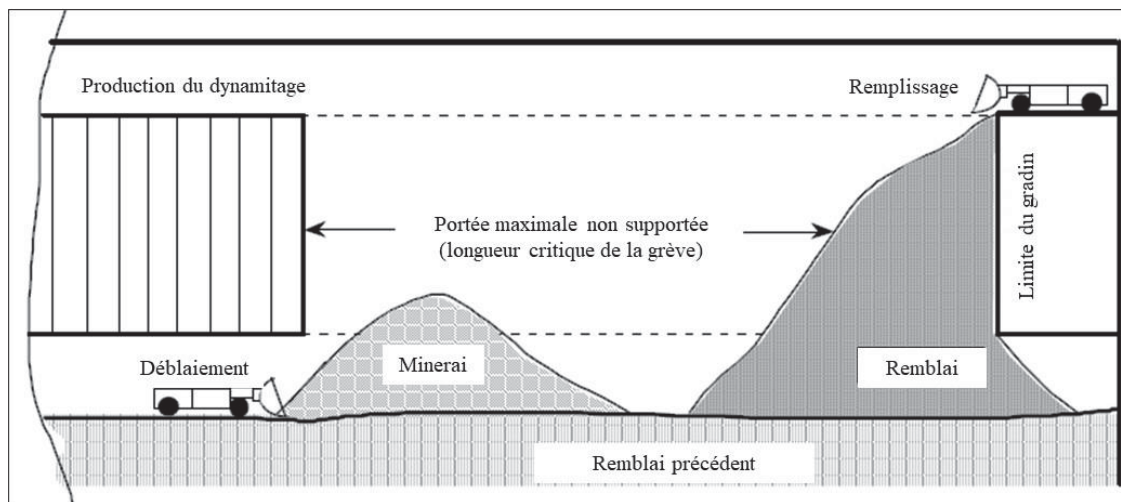


Figure 1.6 Technique de remblayage d'un chantier en exploitation, tirée de Villaescusa et Kuganathan (1998, p.2)



### 1.8.2 Types et caractéristiques de remblais miniers

Les types et caractéristiques des remblais miniers sont déterminés selon leurs compositions. Les types de remblais miniers sont les remblais en pâte cimentés, les remblais hydrauliques, et les remblais rocheux (M Aubertin et al., 2003; Belem, Benzaazoua, & Bussière, 2000; Benzaazoua et al., 2008) (Figure 1.7). Chacun de ces types de remblais est spécifique à une méthode de minage (méthode d'exploitation). Les ingénieurs miniers choisissent le type de remblai en fonction des matériaux de remblayage disponibles sur place et de la résistance mécanique souhaitée.

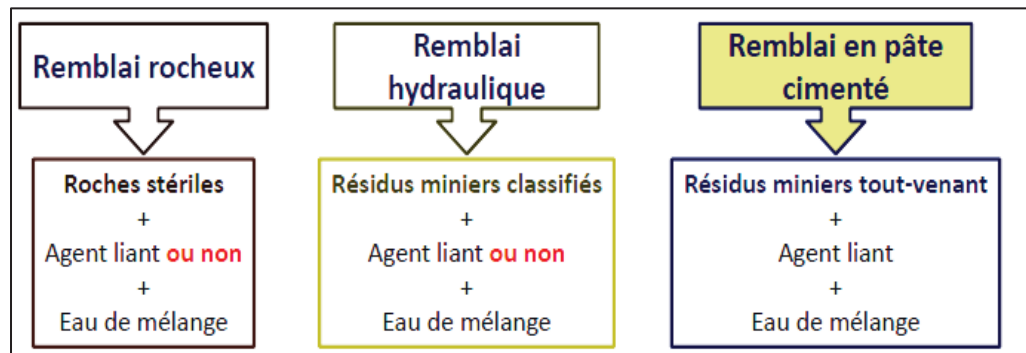


Figure 1.7 Composition des différents types de remblais, tirée du cours GML 6003 descriptions des remblais en pâte cimentés par Tikou Belem (2013, p.9)

L'une des premières exigences de conception des matériaux de remblayage est de fournir une bonne recette de sa composition. Le choix de cette composition est fait selon les critères physico-mécaniques du type de remblai qui va être utilisé et la méthode d'exploitation. Le Tableau 1.4 résume les propriétés des types de remblai (Hassani & Archibald, 1998; Koohestani, Bussière, Belem, & Koubaa, 2017).

Tableau 1.4 Caractéristiques des différents types de remblais,  
tiré de Hassani et Archibald (1998, p.25)

Propriétés	Remblai en pâte cimenté	Remblai hydraulique	Remblai rocheux
État des matériaux	75 à 85 % solide (massique)	60 à 75 % solide (massique)	Sec
Système de transport	Par trou foré ou pipeline, par gravité ; peut-être pompé	Par trou foré ou pipeline, par gravité	Par monterie ou par équipement mobile, ciment à part
Liaison des matériaux	Cimenté seulement	Cimenté ou non	Cimenté ou non
Ratio eau/ciment	Ratio moyen, liant moyen	Ratio élevée, liant faible	Ratio faible, liant élevé
Mise en place	50 à 200 tonnes/h	100 à 200 tonnes/h	100 à 400 tonnes/h
Ségrégation	Pas de ségrégation	Décantation et ségrégation, peu résistante	Empilement et ségrégation, résistance et rigidité réduits
Rigidité	Faible à élevée	Faible	Élevée si mise en place correcte
Densité du remplissage	Facile à maximiser	Impossible à maximiser	Difficile à maximiser
Quantité de liant	Moins grande quantité	Grande quantité	Quantité moyenne
Barricades	Peu dispendieuses	Onéreuses	Non nécessaires
Écoulement des eaux	Négligeable	Abondant	Aucun
Coûts relatifs en capital	Plus élevés	Bas	Modérés
Coûts d'opération	Coûts les plus bas pour un remblai cimenté	Coûts de distribution faibles, moindres si non cimentés	Coûts élevés

Il n'existe pas de recette universelle pour faire un remblai minier, car chaque mine est unique avec sa propre méthode de minage, de dessin (plan), de gisement, de minéraux, de rejets. Les recettes des types de remblais miniers diffèrent d'une mine à une autre. Elles dépendent de certains critères (Benzaazoua et al., 2008; Bernier, Li, & Moerman, 1999) :

- ✓ Stabiliser le remblai grâce à un bon taux de percolation afin de faciliter son transport et son drainage ;

- ✓ Posséder un système de pompage fort pour drainer une grosse quantité de matériaux de remblayage ;
- ✓ Vérifier la taille et la quantité des résidus miniers dans la recette du remblai. Cette vérification permettra de détecter les gros grains qui sont responsables des usures des tuyaux ;
- ✓ Mesurer et vérifier les dimensions exactes de la zone à remblayer afin d'éviter tout débordement ou manquement du matériel de remblayage (Yilmaz, Benzaazoua, Belem, & Bussière, 2009) ;
- ✓ Mesurer la densité, la fluidité et la viscosité du matériel de remblai prêt à être envoyé par les tuyaux jusqu'au chantier à remblayer.

### 1.8.2.1 Le remblai en pâte cimenté

Le remblai en pâte cimenté est l'un des types de remblai le plus utilisé dans l'exploitation de nombreuses mines souterraines au Canada (Belem et al., 2000). Il est composé de résidus fins issus du concentrateur, d'un agent liant (ciment Portland ou ciment composé d'un ou de plusieurs ajouts minéraux) dans une proportion variant entre 3 et 7 % en masse de résidus secs, et d'eau de gâchage (Figure 1.8) (Amaratunga & Yaschyshyn, 1997; Hassani & Archibald, 1998; Potvin, Thomas, & Fourie, 2005; Thompson, Bawden, & Grabinsky, 2012; Yilmaz et al., 2009). Chacun de ces composants a un rôle à jouer :

- ✓ **Liant** : L'ajout de liants vise à renforcer la résistance mécanique.
- ✓ **Eau** : La réactivité des sulfures est négligeable tant que le remblai en pâte demeure saturé en eau. Elle permet également de rendre le mélange de la recette peu ou très pâteux. Elle rend la pâte élastique, homogène, et facilite son transport. Sa quantité a un grand impact sur la résistance mécanique du remblai et doit être contrôlée pour atteindre un affaissement compris entre 6 et 10 pouces (concrete slump test<sup>1</sup>). Le pourcentage de solide est compris entre 70 et 85 %.

---

<sup>1</sup> Concrete slump test : test de mesure d'affaissement avec un cône d'Abrams

- ✓ **Rejet** : Le résidu minier ou rejet minier est un matériau déjà traité issu de l'usine de traitement du matériel économiquement exploitable. Son traitement consiste à enlever les sulfures et les cyanures afin d'éviter toute contamination par ces produits néfastes dans la composition du matériel de remblayage. Sa granulométrie peut être très fine ou moyennement fine, voire peu fine (rigide) (Figure 1.8). Lorsqu'elle est très fine, elle influe sur le taux de consolidation et de drainage. Lorsqu'elle est moyennement fine, voire peu fine, elle influe sur les vides laissés entre les particules de résidus afin de les combler.

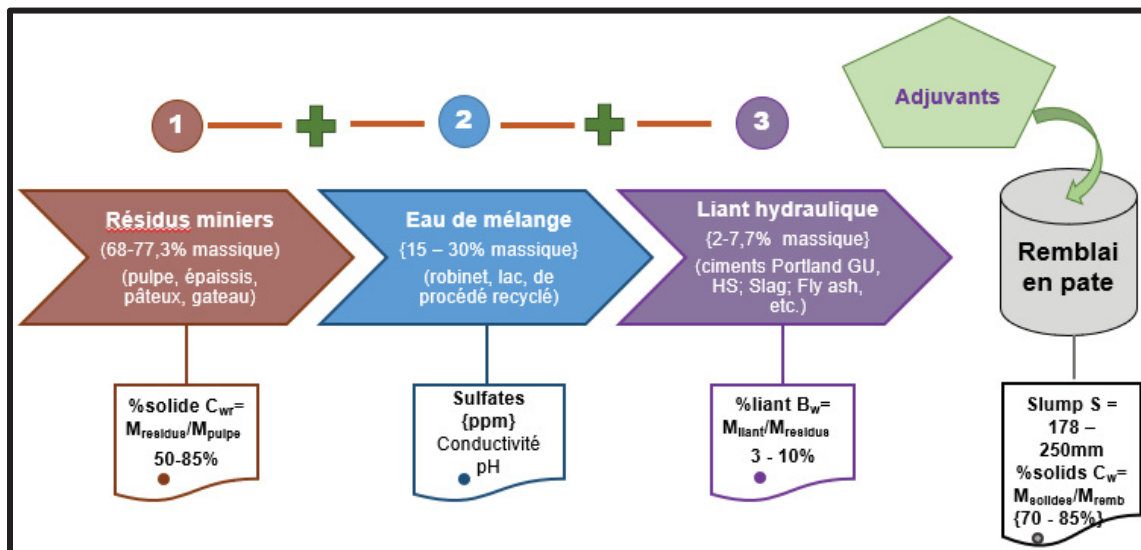


Figure 1.8 Différentes composantes du remblai en pâtes cimenté, tirée du cours GML 6603 descriptions des remblais en pâte cimentés par Tikou Belem, (2013, p.12)

Le seuil de cisaillement (ou d'écoulement) du remblai en pâte cimenté peut varier de 0,01 Pa jusqu'à  $10^3$  MPa. Sa viscosité plastique (coefficient de rigidité) peut varier de  $10^{-3}$  à  $10^2$  Pa.s (Cao, Yilmaz, & Song, 2018; Xiapeng, Fall, & Haruna, 2019). Sur le terrain, les chercheurs confirment une augmentation de l'affaissement initial du remblai en pâte de l'ordre d'un pouce (2,54 cm) entre l'usine de remblai en surface et le chantier sous terre (selon la profondeur et le type de liant). Son transport est facile pour remplir un chantier à cause de son taux d'élasticité et de percolation. La pâte du remblai a une meilleure résistance à la compression qui peut atteindre 1 MPa et plus à 28 jours. Généralement, le matériau à remblayer doit avoir une résistance de 0,7 à 2 MPa sous un essai en compression non confiné ou un essai en compression simple (Fall & Brackebusch, 1994; Li & Aubertin, 2012). Pour les mines utilisant du remblai

en pâte cimenté, la résistance recherchée est souvent beaucoup plus faible ( $\sigma_c = 0,5$  à  $4$  MPa) que celle de la roche encaissante ( $\sigma_c = 5$  à  $240$  MPa) et lorsque le remblai est destiné à supporter le toit, la résistance à la compression uniaxiale ou UCS (Uniaxial Compressive Strength) devrait être de  $5$  MPa (Belem et al., 2000). La résistance mécanique à atteindre varie différemment selon le court et long terme en fonction de la méthode et de la séquence de minage (Belem et al., 2000). Le remblai en pâte cimenté présente des avantages et des inconvénients (Michel Aubertin, Bussière, & Bernier, 2002; Benzaazoua et al., 2008). Il sert à réduire la quantité des déchets miniers issus du concentrateur de l'usine de traitement d'un côté, mais aussi à limiter l'utilisation des eaux pour faire le drainage et favorise la construction des barricades facilement. Son inconvénient est que son utilisation exige un important coût d'infrastructures pour la mise en place de ces outils.

### 1.8.2.2 Le remblai hydraulique

Le remblai hydraulique est un mélange très fluide, composé d'eau, de liants hydrauliques (s'il est cimenté), de rejets de concentrateur, et/ou de sable et de granulat (Belem et al., 2000; Benzaazoua et al., 2008) (Figure 1.9). Le volume du solide varie de  $60\%$  à  $73\%$ . Il peut être cimenté ou non, avec un rapport eau/liants élevé (Potvin et al., 2005). Les étapes pour la fabrication du remblai hydraulique sont simples et semblables à celle du remblai en pâte cimenté. La seule différence est la quantité d'eau utilisée qui est plus élevée pour le premier que pour le second (Figure 1.10).



Figure 1.9 Photos de remblai hydraulique, tiré du cours GML1002 par Tikou Belem, (2017, p.13)

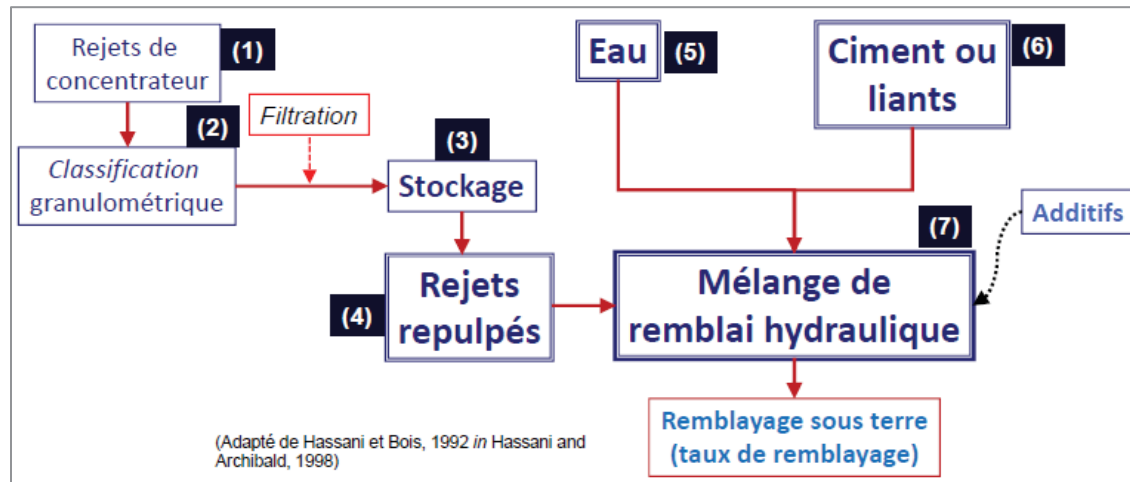


Figure 1.10 Composition du remblai hydraulique, tirée de Hassani et Archibald (1998, p.25)

### ✓ Propriétés physico-mécaniques des remblais hydrauliques

Le remblai hydraulique est un remblai très perméable contenant du liant, des résidus miniers, énormément d'eau qui facilite son drainage, et sa granulométrie est toujours ajustée. Il n'a pas de résistance à la compression, car il est très fluide et entraîne un écoulement avec un drainage rapide (Fall, Adrien, Célestin, Pokharel, & Touré, 2009; Ghirian & Fall, 2013). Comme le remblai en pâte cimenté, le remblai hydraulique présente aussi des avantages et des inconvénients (Fall et al., 2009). Sa mise en place permet de construire des barricades hydrostatiques, de faciliter un pompage rapide et sa ségrégation est facile à cause de sa quantité d'eau. Comparativement aux autres types de remblai, il présente moins d'usures de tuyaux à cause de sa fluidité et de son transport beaucoup plus rapide. Ses inconvénients se trouvent au niveau de la gestion de l'eau dans le chantier remblayé qui peut ne pas être parfois drainée à cause de son excès. Ce problème de gestion d'excès de l'eau peut affaiblir les barricades. Ces affaiblissements des barricades provoqueront un déversement du remblai dans les galeries de soutirage qui engendreront la rupture des barricades. Cette rupture de barricade peut mettre en danger la sécurité des travailleurs et des équipements.

### 1.8.2.3 Le remblai rocheux

Le remblai rocheux, contrairement aux deux autres types de remblais, est un produit constitué de roches stériles hétérogènes, de liants pour la consolidation et très peu ou pratiquement pas d'eau (Figure 1.11). Ces roches stériles sont transportées du chantier par convoyeur ou par camion en fonction de la géométrie du gisement. Le type de liant étant sous forme de coulis avec un pourcentage de solide compris entre 50 et 60 %, son ajout au niveau de la fabrication du remblai rocheux n'est pas nécessairement obligatoire et peut se faire à tout moment lors du remplissage du chantier (Hane, 2015). La quantité de liant utilisée est comprise entre 5 à 6 % de la masse de stériles secs.

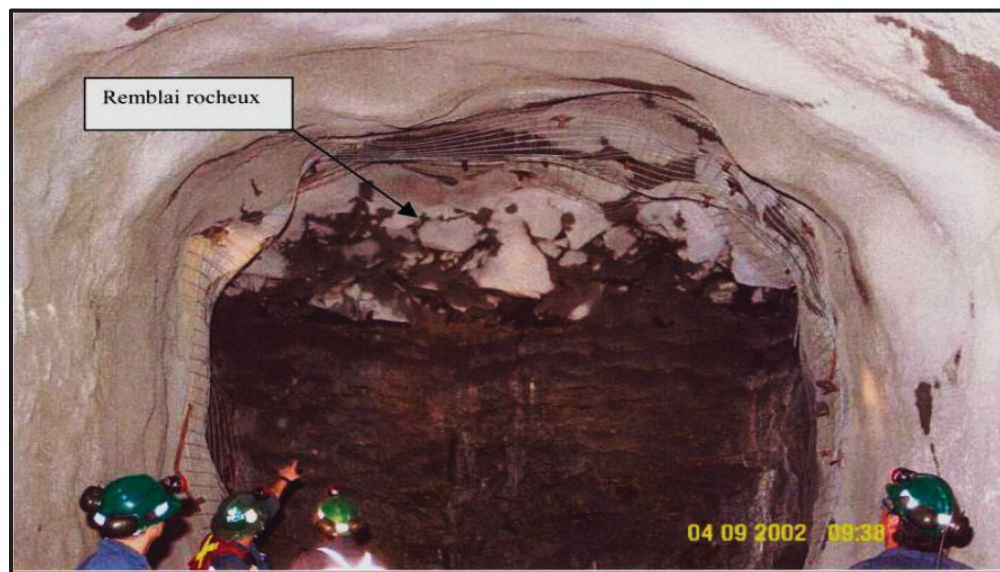


Figure 1.11 Exemple de galerie à travers le remblai rocheux de la mine Louvicourt, tirée du cours GML 6003 de Belem, (2017, p.23)

#### ✓ Propriétés physico-mécaniques des remblais rocheux

Le remblai rocheux a une forte résistance mécanique de 1,5 MPa et son utilisation présente des problèmes à savoir une forte porosité, la ségrégation des particules et une faible résistance mécanique (Hane, 2015). En effet, pour pallier à ces problèmes, il est nécessaire de le mélanger avec du remblai hydraulique, ou d'y ajouter des résidus ou du sable (Hane, 2015).

L'ajout de résidus miniers dans le remblai rocheux permet de contribuer au renforcement de la résistance de ce dernier (Annor, 2002; Emad, Mitri, & Henning, 2012; Wang & Villaescusa, 2001). Comme les deux autres types de remblais miniers décrits ci-dessus, le remblai rocheux présente aussi des avantages et des inconvénients (Annor, 2002; Wang & Villaescusa, 2001). Il permet de réduire le stockage à la surface de roches stériles provenant du développement souterrain ou d'une fosse à ciel ouvert. Il sert aussi à diminuer la construction des barricades et la gestion des eaux de drainage après pompage. Les inconvénients du remblai rocheux se trouvent au niveau des travaux secondaires comme le concassage, le tamisage des roches stériles et le transport à partir de la surface du chantier à remblayer jusqu'au point de déversement sous terre (Michel Aubertin et al., 2002; Benzaazoua et al., 2008).

### **1.8.3 Composition d'une usine de remblai et principe de fabrication**

Une usine de remblais est constituée de différents équipements qui jouent un rôle important au niveau de chaque étape de sa fabrication (Figure 1.12). Elle est composée d'un épaisseur pour épaisir les rejets miniers et enlever les restants d'eau (1). Cet épaisseur est directement connecté aux filtres à disques pour une filtration afin d'avoir l'épaississement parfait et des résidus secs (2). En bas de ces filtres se trouvent des silos à ciment qui sont remplis de tonnes de ciment. Ces silos sont munis d'une trémie à rejet filtré pour tamiser le ciment (3). Les silos à ciment fournissent directement du ciment au fur et à mesure au malaxeur. Tout en bas des silos à ciment se trouve un disque à vis appelé malaxeur qui sert à mélanger de façon homogène tous les composants de la recette (4). Ce malaxeur continue de fonctionner constamment tant que la production du remblai minier est demandée au niveau du chantier à remblayer. Les trois équipements cités ci-dessus (épaisseur, silos à ciment, malaxeur) sont tous liés à une même balance pour peser chaque quantité de composants dans la préparation du remblai (5). L'usine possède également un réservoir d'eau pour alimenter le remblai en quantité d'eau suffisante demandée (ASTM1356-08). Une pompe à piston est reliée au malaxeur pour envoyer le mélange sous forme de pâte dans les tuyaux (pipe) prévus à cet effet. Ces tuyaux envoient au chantier à remblayer le remblai fabriqué.



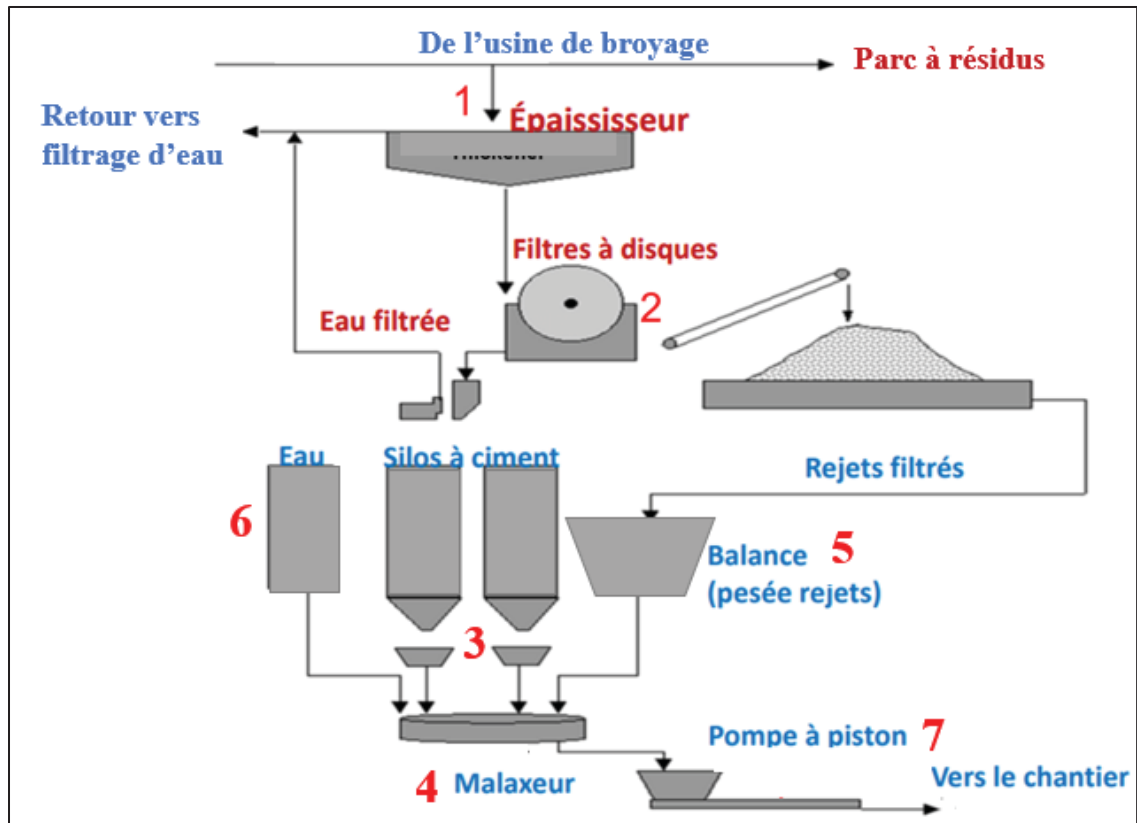


Figure 1.12 Composition d'une usine de fabrication de remblais, tirée du Cours 11 description des remblais en pâte cimentée de Tikou Belem, (2013, p50).

#### 1.8.4 Les problèmes techniques liés au transport

Les moyens de transport sont nombreux dans l'industrie minière et ils sont utilisés selon leurs nécessités. Le transport de chaque type de remblai est différent l'un de l'autre. Le remblai hydraulique est transporté par tuyaux mis depuis les trous de forage jusqu'aux chantiers ouverts à remblayer. Le surplus d'eau dans les chantiers doit être évacué par pompage vers la surface ou recyclé ailleurs dans la mine dans des bassins prévus à cet effet. Le remblai rocheux est transporté par camion ou par convoyeur. Le remblai en pâte cimentée est transporté dans les tuyaux sous une forte pression et pompé directement sous terre dans la zone à remblayer. Le remblayage minier présente des difficultés techniques parmi lesquelles il y a les problèmes de liquéfaction, de porosité, de tailles de particules, de contamination en sulfures, de dessiccation (Benzaazoua et al., 2008; Yilmaz et al., 2009) (Figure 1.13). Sans l'ajout des liants, le remblai en pâte peut rester en un état de fluide pendant des jours, des semaines et même des années.

C'est le seul remblai qui ne peut pas être déposé dans les chantiers secondaires ou tertiaires sous une forme non-cimentée (Belem et al., 2000). Le problème de taille des particules grossières est fréquent à cause de la maîtrise de la granulométrie dans la recette du remblai. Ce problème entraîne un blocage au niveau des tuyaux au moment du transport des remblais en pâte cimentés et une usure excessive des tuyaux. Ce type de problème conduit à la création d'un chantier secondaire pour forer les tuyaux endommagés, d'où une perte de temps, d'énergie et d'économie pour l'industrie. Pour pallier ces problèmes, il est conseillé, quelles que soient les propriétés du remblai en pâte cimenté et fabriqué, d'effectuer des tests au laboratoire (Figure 1.13). Selon certains auteurs, le taux d'affaissement idéal pour le remblai minier doit être compris entre 150 mm (6 po) pour les remblais très pâteux et 250 mm (10 po) pour les remblais très fluides (hydrauliques) (Belem et al., 2000; Benzaazoua et al., 2008; Yilmaz et al., 2009). Il est important, voire nécessaire, d'effectuer des essais sur les résidus miniers pour filtrer les résidus afin de diminuer leurs taux de sulfures. Le taux de sulfure recommandé est compris entre 0,1 et 0,3 % de sulfure (Brial et al., 2021; Xiapeng et al., 2019; Yilmaz et al., 2009).

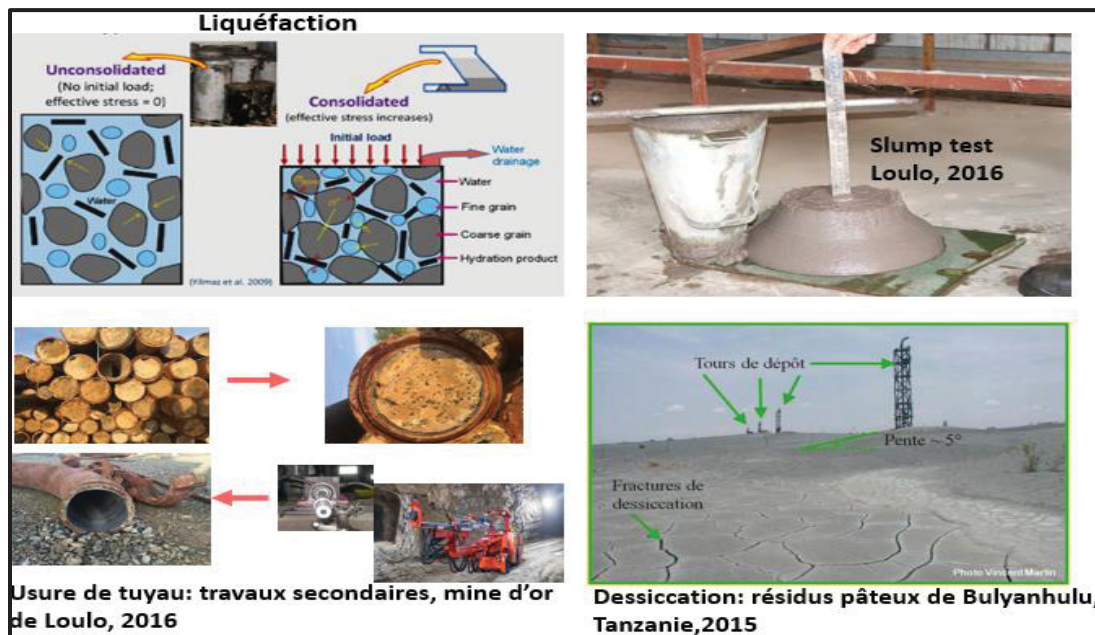


Figure 1.13 Photos des différents problèmes techniques rencontrés dans les industries minières, tirées du rapport annuel Barrickgold mining (2016, p.66 et 2015. p.24)

### 1.8.5 Les résidus miniers : types, caractéristiques et transport

Les résidus miniers sont des déchets issus du traitement du minerai brut extrait de la mine. Ils sont sous forme de résidus épaissis, non épaissis, filtrés et en pâtes (Figure 1.14) (MEND, 2017). Chacun de ces types de résidus miniers présente des caractéristiques différentes. Leur transport se fait avec des engins différents à cause de leurs granulométries et leurs propriétés physico-mécaniques (Figure 1.15).

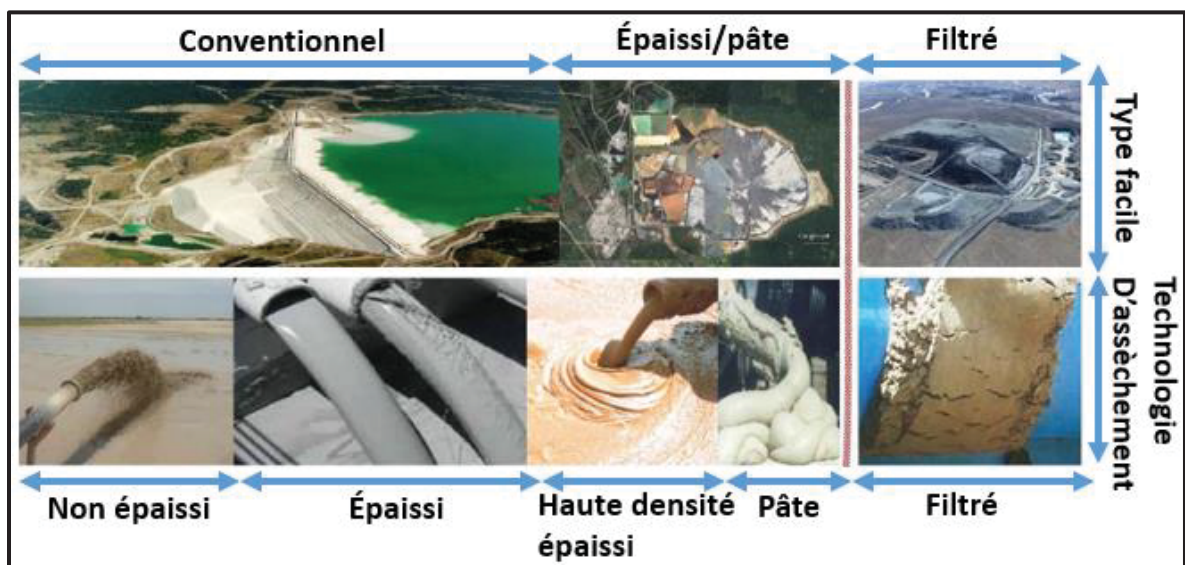


Figure 1.14 Types de résidus miniers, tirée de MEND (Mine Environnement Neutral Drainage) (2017, p.36)

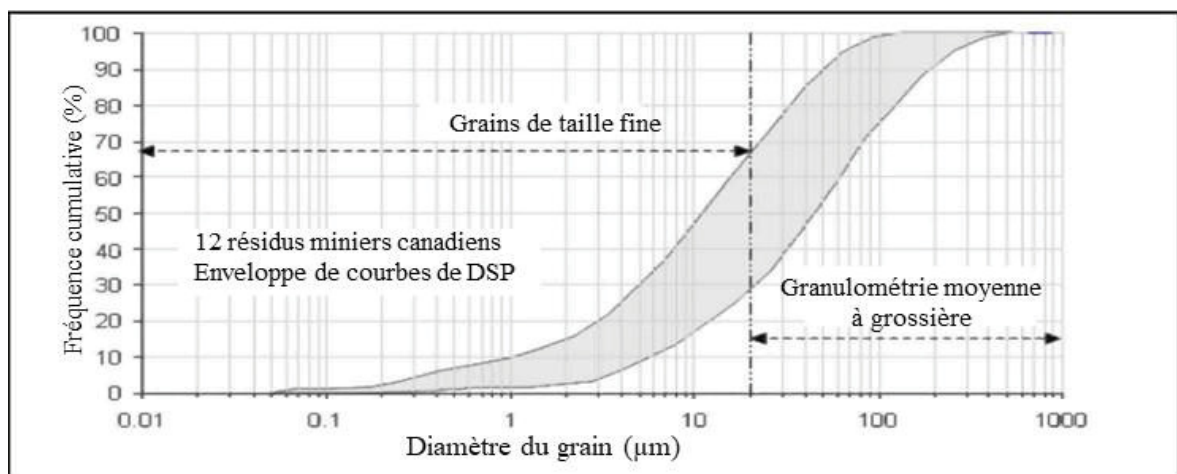


Figure 1.15 Classe granulométrique des résidus miniers tirée de Belem et Benzaazoua (2008, p.17)

Au Canada, les compagnies minières utilisent généralement les résidus miniers dans la recette des remblais miniers. Ils sont issus de l'usine de traitement à l'état pulpeux avec un pourcentage solide compris entre 25 et 50 % (Benzaazoua et al., 2008; Bussière, 2007; Ouattara, Yahia, Mbonimpa, & Belem, 2017).

À leur sortie de l'usine, ils sont épaissis grâce à un épaisseur afin d'avoir un pourcentage solide compris entre 50 et 70 % (Hane, 2015). Ils sont ensuite passés par des filtres sous vide ou à presse afin de les épaissir pour avoir un pourcentage solide compris entre 70 et 85%. Le dernier épaisseur rend les résidus secs et ils sont ainsi appelés résidus filtrés. Ces résidus filtrés sont mélangés à d'autres composants comme le ciment, l'eau et le plastifiant pour produire du remblai minier. La pâte fabriquée est acheminée à l'aide d'un tuyau par pompage avec une contrainte de cisaillement comprise entre 40 Pa et 200 Pa au niveau de la zone à remplir sur le chantier (Benzaazoua et al., 2008; Lu et al., 2018; Potvin et al., 2005).

#### **1.8.5.1 Les propriétés physico-mécaniques**

Les propriétés physico-mécaniques du type de résidus utilisés dans la recette sont l'un des paramètres les plus importants dans la préparation des remblais miniers. Les résidus produits par les mines partout au Canada ont une vaste gamme de propriétés physiques, mécaniques et géochimiques. Les caractéristiques typiques des résidus produits par les compagnies minières canadiennes sont résumées dans le Tableau 1.5.

Tableau 1.5 Résumé des types de résidus avec leurs différentes caractéristiques, tirée de Belem et Benzaazoua (2008, p.26)

Types de résidus	Plage de contraintes d'élasticité (Pa)	Équipement du processus	Teneur en solide au dépôt	Modes de transport	Ségrégation	Degré de saturation	Teneur en solide in situ
<b>Non épaissi</b>	< 10	Produits de l'usine de traitement sans assèchement supplémentaire	20 à 40 %	Tuyaux et pompes centrifuges	Haute	100 %	76 %
<b>Épaissi</b>	< 30	Floculants et épaississants conventionnels / Épaississants à haut débit	40 à 60 %	Tuyaux et pompes centrifuges	Haute	100 %	77 %
<b>Épaissi à haute densité</b>	100 < 200 < 300	Floculants et épaississants à haute densité/ Floculants et épaississants / à cône profond	60 à 70 %	Tuyaux et pompes centrifuges	Moyen	100 %	78 %
<b>En pâte</b>	200 < 300 < 400	Floculants et épaississants à cône profond / Combinaison d'épaississants et de filtres	70 à 75 %	Tuyaux et pompes centrifuges	Faible	100 %	79 %
<b>Filtré</b>	N/A	Filtre (sous vide ou sous pression)	> 75 %	Camion ou convoyeur	Faible	< 95 %	83 %

### 1.8.5.2 Les mauvaises gestions des résidus miniers : conséquences environnementaux

La technologie de la pâte est née dans l'industrie des mines de métaux de roches dures il y a une vingtaine d'années (Bernier et al., 1999; Yilmaz et al., 2009). Les résidus provenant des opérations d'extraction de métaux étaient classiquement éliminés sous forme de lisier dans un bassin artificiel de surface près d'un complexe minier. Une telle élimination peut entraîner des impacts environnementaux tels que les fuites de produits toxiques produisant ainsi le drainage

minier acide dans les bassins naturels comme les fleuves, les rivières et d'autres cours d'eau, la production de poussière et les ruptures de barrages (Figure 1.16).

(Azam & Li, 2010; Rico, Benito, Salgueiro, Díez-Herrero, & Pereira, 2008).



Figure 1.16 Effets techniques de la mauvaise gestion des résidus miniers sur l'environnement, tirée de Azam et Li, (2010, p.23) ; Rico et al., (2008, p.8).

Pour pallier une partie des impacts environnementaux liés aux productions de béton et de remblais miniers, cette étude va utiliser les brasques traitées pour diminuer l'utilisation de la quantité de ciment dans les recettes de ces matériaux. Pour évaluer les impacts potentiels des brasques traitées, l'étude va réaliser leur analyse de cycle de vie lorsqu'elles sont utilisées dans les productions de béton et de remblai en pâte cimenté.

## 1.9 L'analyse de cycle de vie

L'analyse du cycle de vie (ACV) est un outil qui permet d'évaluer les intrants, les extrants, et les impacts environnementaux d'un produit tout au long de son cycle de vie (Jolliet, Saadé, & Crettaz, 2010). L'ACV peut être réalisée du berceau à la tombe (1), c'est-à-dire de l'extraction à la transformation des ressources jusqu'à leur fin de vie, y compris les étapes de production et d'utilisation ; du berceau à la porte c'est-à-dire de l'extraction jusqu'à l'étape de production (2) et l'ACV peut se faire aussi de la porte à la porte c'est-à-dire que l'analyse se concentre uniquement à la phase de production du produit (3). La réalisation d'une ACV permet d'établir les données d'inventaire du cycle de vie (ICV) associées aux activités du produit à étudier. Ces

informations sont les données entrantes et extrantes appelées également les flux entrants et sortants, utilisés pour construire les différents scénarios de l'étude. L'ACV possède une méthodologie standardisée à l'échelle internationale par les normes ISO 14040 et ISO 14044 (International Organization for Standardization 14040 et 14044) (AFNOR, 2006). Selon la norme ISO 14040, l'ACV se réalise en 4 étapes différentes (Figure 1.17).

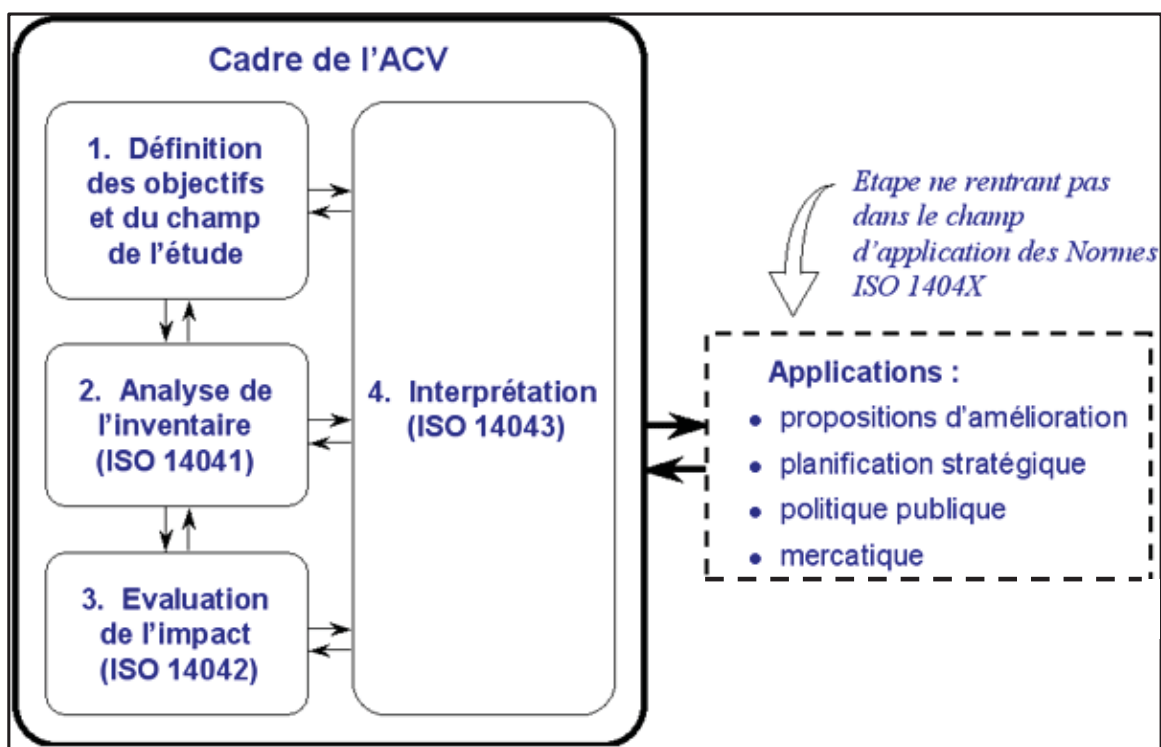


Figure 1.17 Cadre méthodologique pour réaliser une ACV, tirée de ADEME et UVED (2012, <http://www.ademe.fr/internet/eco-jean/>)

### 1.9.1 Définition des objectifs et du champ de l'étude

Dans une étude d'analyse de cycle de vie d'un produit, cette partie décrit clairement les objectifs de l'étude. Cette partie explicite les problématiques liées à l'étude, le champ de l'étude c'est-à-dire les frontières du système, l'unité fonctionnelle, les hypothèses, les limites de l'étude, les cibles de l'étude et la manière dont seront divulgués les résultats. C'est au niveau de cette étape que les différentes règles pour les calculs appliqués à l'étude seront fixées.

### **1.9.2 Inventaire du cycle de vie (ICV)**

Cette phase en ACV consiste à réaliser les inventaires des flux de matière et d'énergie entrants et sortants aux frontières d'un système donné. Cette partie permet de déterminer les différents flux (flux entrants et sortants) pour modéliser le système étudié. Tous ces flux entrants et sortants vont être quantifiés pour chacune des phases du cycle de vie du produit.

### **1.9.3 Évaluation de l'inventaire du cycle de vie (ÉICV)**

Cette partie de l'étude consiste à évaluer les données collectées au moment de l'inventaire. Les flux de l'inventaire (entrants et sortants) une fois déterminés sont convertis en catégories d'impacts environnementaux (Midpoint et Endpoint). Le Midpoint caractérise les indicateurs orientés problèmes et l'impact apparaît au milieu de la chaîne de causalité. L'Endpoint caractérise les indicateurs orientés dommages et l'impact se trouve à la fin de la chaîne de causalité. Chaque flux sortant (substance émise) est converti à l'aide d'un facteur de caractérisation en substance de référence équivalente pour chacune des catégories d'impacts. L'ÉICV permet de faire un bilan de l'ensemble des flux entrants et des flux sortants, c'est-à-dire elle prend en compte les ressources énergétiques, les matières premières et les transports nécessaires pour fabriquer un produit ou un système.

### **1.9.4 Interprétation des résultats**

La dernière étape concerne l'interprétation des résultats et elle permet de répondre aux objectifs de l'étude. Dans cette partie, la robustesse des résultats de l'étude est vérifiée ainsi que la sensibilité des résultats. Les résultats de l'ACV peuvent avoir des limitations à cause de la disponibilité et la qualité des données (Patrick, 2022). Les données peuvent parfois être inaccessibles, voire mal connues. Les résultats obtenus après les études ne sont pas divulgués au public à cause de leurs confidentialités.

En outre, l'ACV ne doit pas être perçue comme l'outil à tout faire et elle n'est pas performante dans l'évaluation des nuisances telles que l'impact paysager, les odeurs et le bruit.



## **CHAPITRE 2**

### **MATÉRIELS ET MÉTHODES**

#### **2.1 Définition de l'ACV**

L'ACV réalisée dans cette étude, permet de comparer les impacts environnementaux liés à l'utilisation des brasques traitées et de la cendre volante dans la production du béton. L'ACV de cette étude est réalisée en tenant en compte des étapes obligatoires qui sont la définition de l'objectif et du champ de l'étude, la détermination de la fonction et de l'unité fonctionnelle, l'inventaire du cycle de vie et l'interprétation des résultats.

##### **2.1.1 Définition de l'objectif et du champ de l'étude**

Cette phase de l'analyse consiste à évaluer les impacts environnementaux et de déterminer les empreintes carbone liées à l'utilisation des brasques traitées et de la cendre volante dans la production du béton. Ainsi, les proportions 5 %, 10 % et 15 % de brasques traitées et de la cendres volante sont utilisées comme substituts au ciment dans la recette du béton (Tableau 2.1). La réalisation de cette ACV va permettre de connaître les impacts environnementaux engendrés au cours de la fabrication de différents bétons en remplaçant une partie du ciment par des brasques traitées. Comme toutes les études d'ACV, cette étude est réalisée en définissant l'unité fonctionnelle qui permet de quantifier la fonction du produit.

##### **2.1.2 Fonction et unité fonctionnelle**

La fonction d'un système est un paramètre qui permet de décrire le besoin auquel le système doit répondre (CIRAIG, 2022). L'unité fonctionnelle est une description quantifiée de la performance des systèmes du produit, destinée à être utilisée comme unité de référence (Weidema, Wenzel, Petersen, & Hansen, 2004).. L'unité fonctionnelle de cette étude est la production d'un mètre cube de béton de 35 MPa d'une durée de vie de cinquante ans pour un usage résidentiel avec des granulats non réactifs dans une usine de fabrication de béton à

Montréal en 2022. Ce choix de l'unité fonctionnelle est fait en tenant compte et en respectant les exigences de la norme de fabrication de béton par l'Association Canadienne de Normalisation en 2019 ou CSA (Canadian Standards Association) (CSA, 2019a). Des tests supplémentaires sont nécessaires pour confirmer les usages et la durée de vie selon la norme CSA. Pour couvrir les besoins de l'unité fonctionnelle, il est important de déterminer les flux de référence. Cela consiste à déterminer la quantité de produits nécessaires pour remplir la fonction étudiée. Les scénarios de cette étude sont le béton normal (sans ajouts cimentaires, et sera considéré comme référence) et les bétons avec des brasques traitées et de la cendre volante de 5 à 15 % en substitut au ciment (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 Scénarios de fabrication du béton avec du LCLL Ash et/ou de la cendre volante

<b>Scénarios</b>	<b>Formulations</b>
<b>1</b>	100 % ciment sans LCLL Ash ou cendre volante
<b>2</b>	5 % du LCLL Ash 95 % ciment
<b>3</b>	10 % du LCLL Ash 90 % ciment
<b>4</b>	15 % du LCLL Ash 85 % ciment
<b>5</b>	5 % de la CV 95 % ciment
<b>6</b>	10 % de la CV 90 % ciment
<b>7</b>	15 % de la CV 85 % ciment

### 2.1.3 Hypothèses de l'étude

Au cours de cette étude, il est considéré que les matières premières, à savoir le ciment, les graviers, et le sable sont transportés par camion depuis leurs usines de production jusqu'à l'usine de béton à Montréal, donc leurs transports ont été pris en compte. Les brasques traitées vont quitter l'entreprise Rio Tinto à Saguenay pour l'usine de fabrication du béton, les cendres volantes vont provenir du Nouveau-Brunswick, des États-Unis, de la Saskatchewan, ou de l'Italie, pour être transportées à Montréal.

L'eau et l'électricité vont venir directement de l'usine de béton à Montréal. Ainsi, les hypothèses considérées sont résumées dans le (Tableau 2.2).

Tableau 2.2 Hypothèses prises en compte dans l'étude

<b>1</b>	Transport par camion des matières premières (ciment, graviers, sable et eau) jusqu'à l'usine de béton
<b>2</b>	Transport par camion des brasques traitées jusqu'à l'usine de béton
<b>3</b>	Les cendres volantes vont provenir du Nouveau-Brunswick, des États-Unis, de la Saskatchewan par camion ou de l'Italie par bateau et camion
<b>4</b>	Type de four choisi pour la calcination des brasques : four rotatif de clinker
<b>5</b>	Transport de l'électricité et de l'eau de robinet n'ont pas été pris en compte, car considéré comme fournit directement à l'usine de béton
<b>6</b>	Températures de calcination : 800, 1000 et 1450 °C

#### 2.1.4 Méthode d'impact choisie : la méthode ReCiPe Midpoint H

La méthode ReCiPe est une méthode d'analyse d'impact dans l'ACV. C'est une méthode qui a été développée pour la première fois en 2008 grâce à la coopération entre RIVM (Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieu), l'Université Radboud de Nimègue, l'Université de Leiden et la présustainability (prédurabilité) (Huijbregts et al., 2016). En 2009, Goedkoop et al. ont développé la méthode en fournissant des facteurs de caractérisation aux catégories Midpoint et Endpoint (Goedkoop et al., 2009). La méthode a après connu une amélioration en 2016 et la nouvelle version ReCiPe 2016 créée est plus développée que ReCiPe 2008. En 2016, cette amélioration de la méthode ReCiPe a apporté l'ajout des impacts de l'utilisation de l'eau sur la santé humaine, les écosystèmes (d'eau douce et terrestre), les impacts du changement climatique sur les écosystèmes d'eau douce, et les impacts de la formation d'ozone troposphérique sur les écosystèmes terrestres (Huijbregts et al., 2016). ReCiPe 2016 une méthode qui rassemble les points intermédiaires en un ensemble de trois catégories de points finaux et combinant à la fois les catégories d'impact des indicateurs médians Midpoint ou des indicateurs de point final (Van Hoof, Vieira, Gausman, & Weisbrod,

2013) (Figure 2.1). La méthode ReCiPe Midpoint peut modéliser sous la version hiérarchiste (H) qui est un modèle consensus utilisé par défaut, recommandé pour caractériser les catégories d'impacts acidification et formation d'ozone photochimique; et la version égalitaires (E) qui est un modèle qui prend en compte le principe de précaution avec une approche à long terme. La méthode utilisée dans cette étude est la méthode ReCiPe Midpoint H.

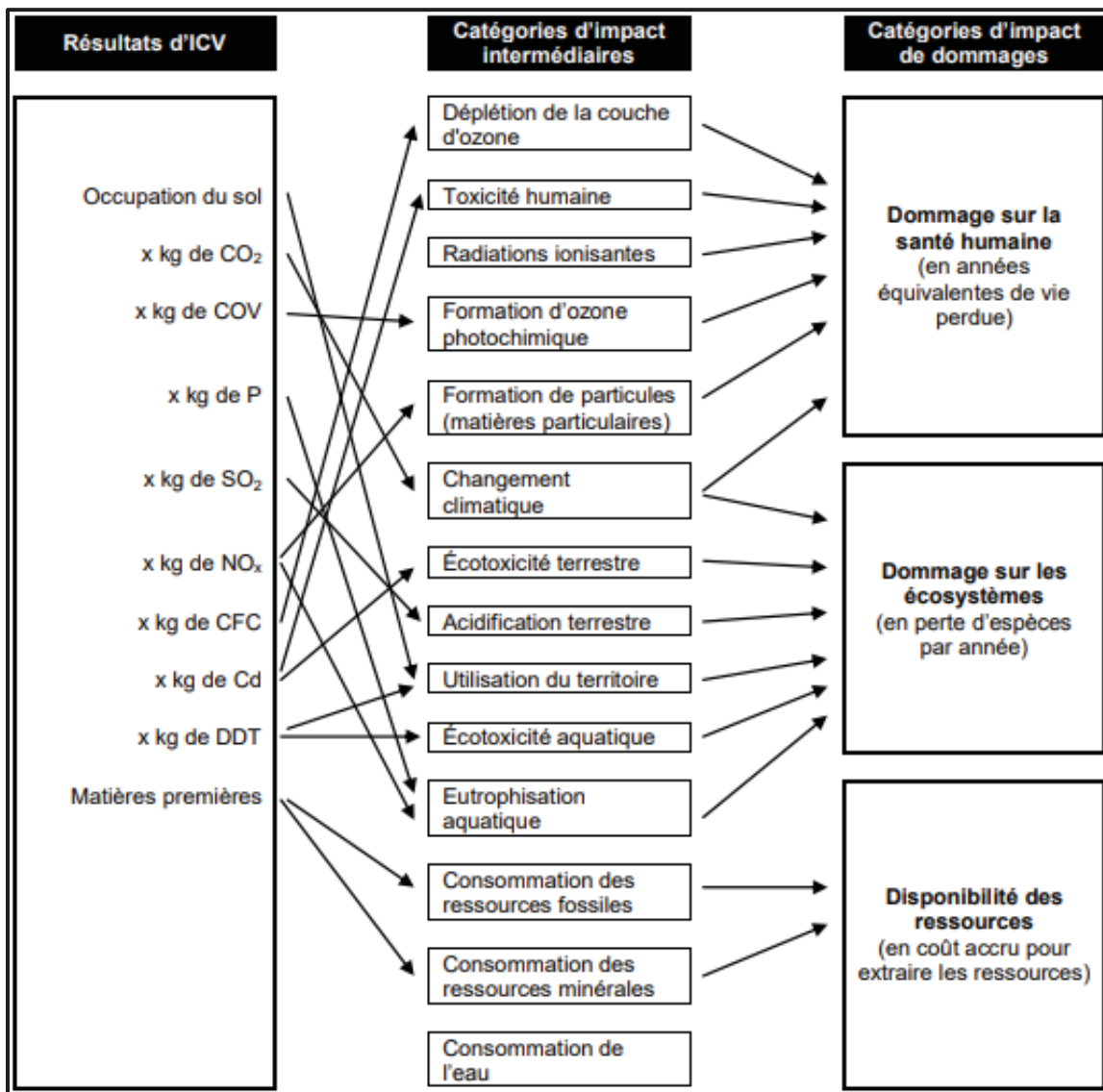


Figure 2.1 Relations entre les données de l'ICV, les catégories d'impact intermédiaires et les catégories de dommages dans ReCiPe, tirée de modifiée de Goedkoop et al., (2009, p.3)

Comme toutes les méthodes de l'ACV, la méthode ReCiPe présente des avantages et des inconvénients (Huijbregts et al., 2016).

#### **Avantages de la méthode ReCiPe**

- ✓ Bonne utilisation des mécanismes d'impact de portée mondiale ;
- ✓ Intégration de nouvelles données et de nouvelles recherches à chaque mise à jour ;
- ✓ Amélioration de l'interaction entre des indicateurs de catégories « midpoint » et « Endpoint » (dommages) ;
- ✓ Présentation d'une bonne solidité scientifique et utilisation des facteurs de caractérisation déjà mis à jour ;
- ✓ Bonne illustration de la différence entre les méthodes intermédiaires et de dommages, de même que la séquence entre ces deux niveaux d'évaluation ;
- ✓ Démonstration de la complexité de l'attribution des résultats d'ICV à chaque catégorie d'impact et de la répartition des catégories d'impact intermédiaires aux catégories de dommages.

#### **Inconvénients de la méthode ReCiPe**

- ✓ Acceptation difficile par les parties prenantes, car elle n'est pas facile à comprendre ;
- ✓ Considération limitée car la méthode ReCiPe Midpoint H est considérée comme le modèle par défaut par leurs auteurs au niveau de certains documents scientifiques ;

Les catégories d'impact évaluées dans cette étude sont présentées dans le (Tableau 2.3). Ces catégories d'impacts présentent chacune des unités différentes (Tableau 2.3).

Tableau 2.3 Catégories d'impacts de la méthode ReCiPe avec leurs unités

<b>Catégories d'impacts</b>	<b>Unités</b>
Changement climatique	kg CO <sub>2</sub> eq
Toxicité humaine: cancer ou non-cancer	kg 1,4 DCB
Épuisement des métaux	kg Fe-Eq
Épuisement des fossiles	kg oil
Rayonnements ionisants	Kg U235-Eq
Transformation naturelle des terres	m <sup>2</sup>
Eutrophisation d'eau douce	Kg P-Eq
Épuisement d'eau	m <sup>3</sup>
Acidification terrestre	Kg SO <sub>2</sub> -Eq
Formation des matières particulaires	Kg PM10-Eq
Formation d'oxydants photochimiques	kg NMVOC
Eutrophisation marine	kg N-Eq
Occupation des terres agricoles	m <sup>2</sup> a
Appauvrissement de la couche d'ozone	kg CFC-11-Eq
Écotoxicité d'eau douce	kg 1,4-DCB-Eq
Écotoxicité marine	kg 1,4-DCB-Eq
Écotoxicité terrestre	kg 1,4-DCB-Eq

### 2.1.5 Frontière de système

Cette partie de l'étude consiste à modéliser des systèmes de produits pour lesquels les processus élémentaires sont identifiés en précisant leurs frontières. Selon ISO 14040, la frontière de système permet d'identifier les produits nécessaires pour répondre à la fonction à étudier et l'unité fonctionnelle. Les quantités des produits analysés, nécessaires pour couvrir les besoins de l'unité fonctionnelle sont désignés par les flux de références. Grâce à ces l'unité fonctionnelle, l'étude permet la comparaison entre les systèmes étudiés sur la base de la même fonction. L'analyse de cycle de vie de cette étude se fait du berceau à la porte c'est-à-dire que l'analyse considère l'ensemble de la phase de production du béton en utilisant les brasques traitées calcinées à 800 °C et la cendre volante comme substituts au ciment. Les quantités des flux entrants et extrants sont insérés dans le système avec leurs valeurs respectives (Tableau 2.4, Tableau 2.5 et Tableau 2.6). Ces données sont les données expérimentales utilisées pour fabriquer le béton au laboratoire de l'ÉTS.

L'analyse s'effectue avec le logiciel OPENLCA 3.10.1 et la base de données Ecoivent version 3.7. Les frontières du système de l'étude sont représentées par les Figure 2.2, Figure 2.3 et Figure 2.4. Les systèmes ont été modélisés en créant des procédés (processus) de fabrication des bétons. Ces processus sont composés des différents flux de chaque composant qui contribue à la fabrication des types de béton. Les processus créés sont les processus de béton ordinaire considéré comme le béton de référence, le béton avec du LCLL Ash, le béton avec du LCLL Ash calciné et le béton avec de la cendre volante. Pour réaliser les modélisations les systèmes du béton avec du LCLL Ash et celui avec de la cendre volante, les flux sur le ciment, le sable, le gravier, l'eau, le plastifiant, le LCLL Ash, l'électricité, les transports par camion et par bateau, et la cendre volante qui sont déjà présents dans la base de données Ecoivent ont été sélectionnés. Pour réaliser la modélisation du béton avec du LCLL Ash calciné, le flux sur le LCLL Ash calciné n'existe pas dans la base de données. L'étude a créé un flux de LCLL Ash calciné et des processus de LCLL Ash calciné à 800 °C, 1000°C, et 1450 °C en prenant en compte comme flux entrants le LCLL Ash, l'électricité et le pétrole coke qui est une matière solide riche en carbone provenant du raffinage du pétrole et utilisé comme combustible pour calciner les matériaux. Ce processus de LCLL Ash calciné a pour flux sortants, des flux de LCLL Ash calciné à 800 °C, 1000°C, et 1450 °C et du dioxyde de carbone. Les flux sélectionnés sont localisés au Québec-Canada, dans le monde et les processus utilisés sont des processus désagrégés. Après la création de ces processus contenant les flux entrants des composantes du béton, des calculs du système des bétons seront faits par la suite et associés à des projets de production du béton qui doivent comprendre tous les systèmes de produits de béton avec du LCLLash, du LCLLash calciné et de la cendre volante. Ainsi, la création de ces systèmes de produit permettra d'avoir les différents diagrammes obtenus comme résultats.

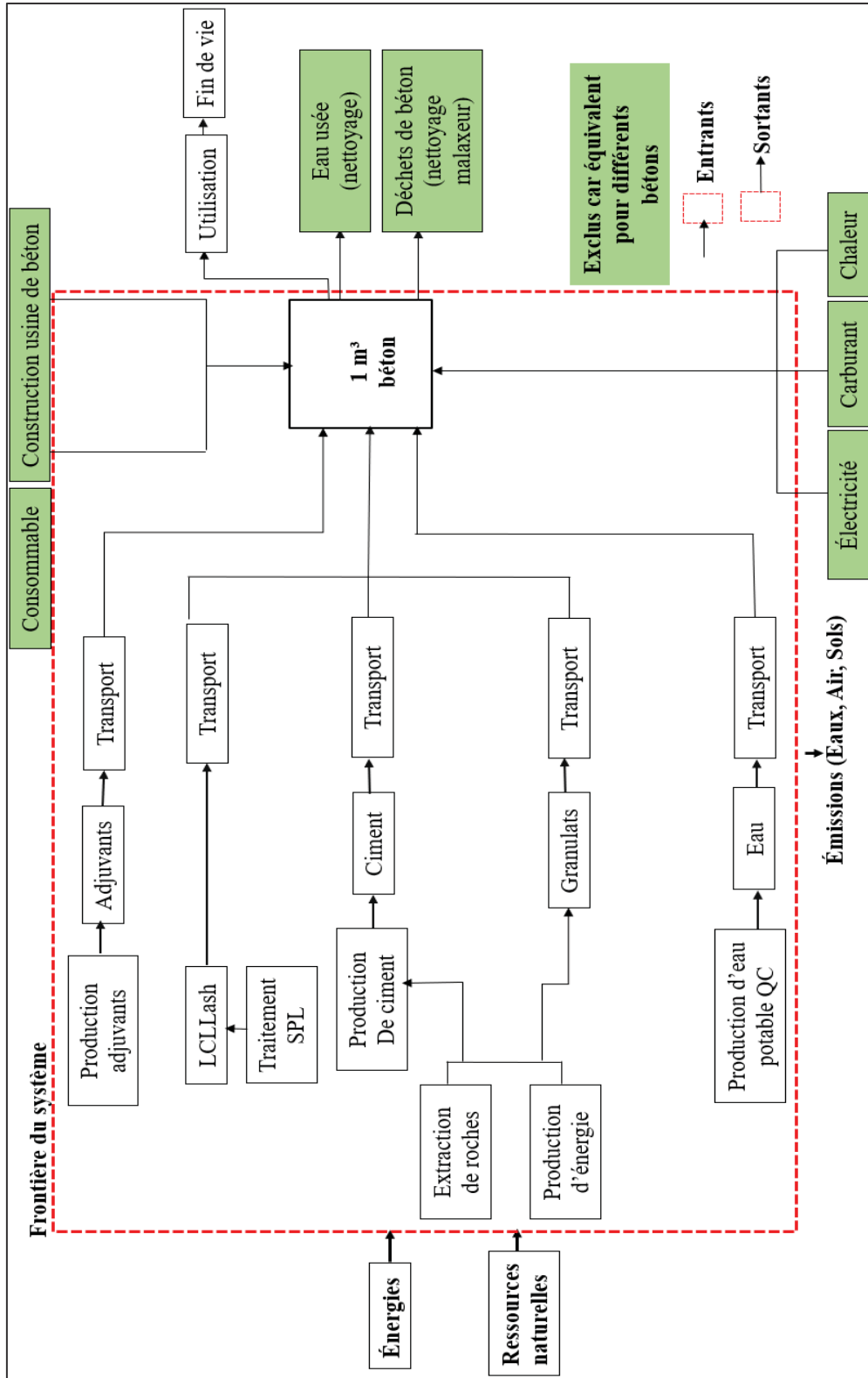


Figure 2.2 Frontière des systèmes de production de béton avec du LCLL Ash



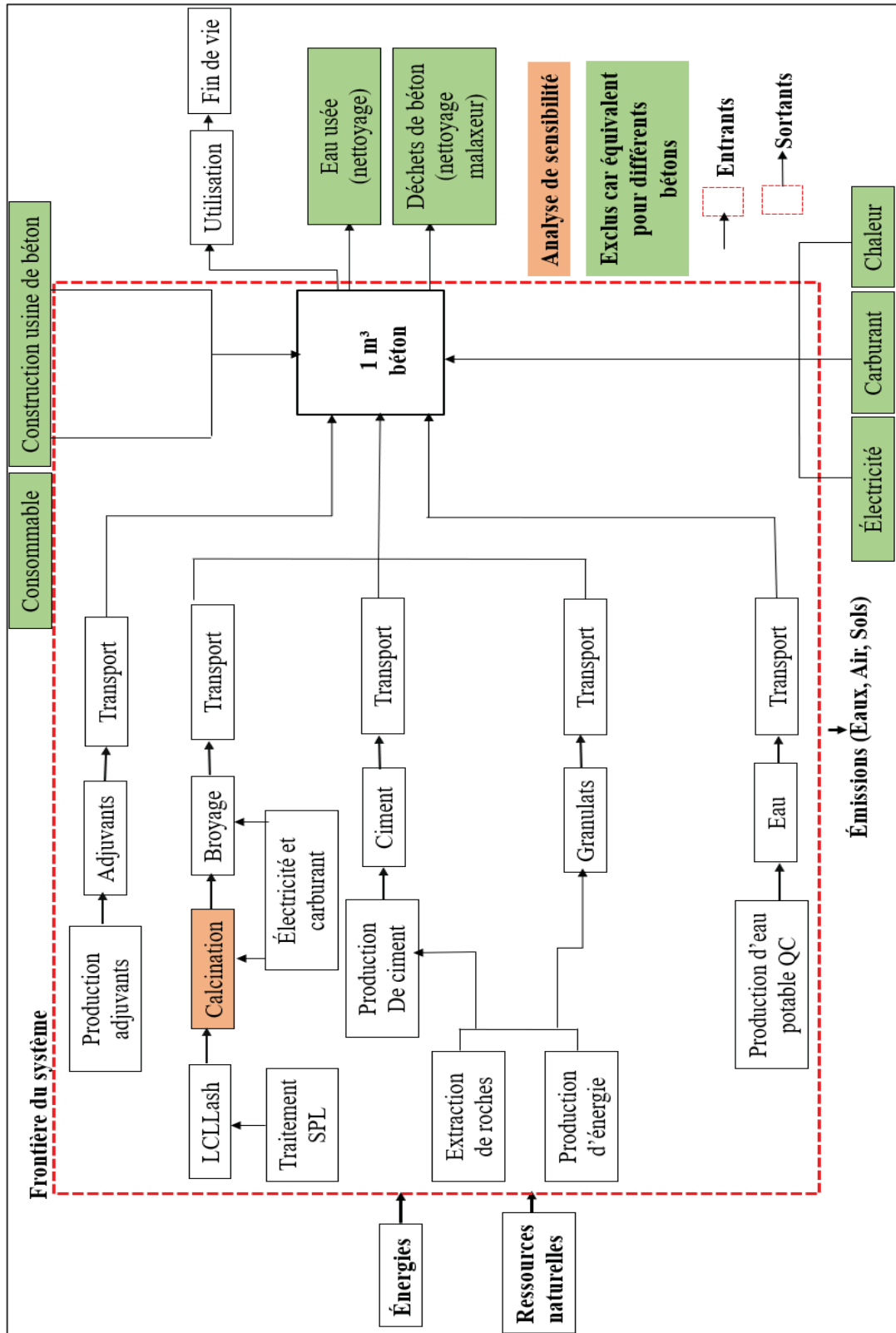


Figure 2.3 Frontière des systèmes de production de béton avec du LCLL Ash calciné

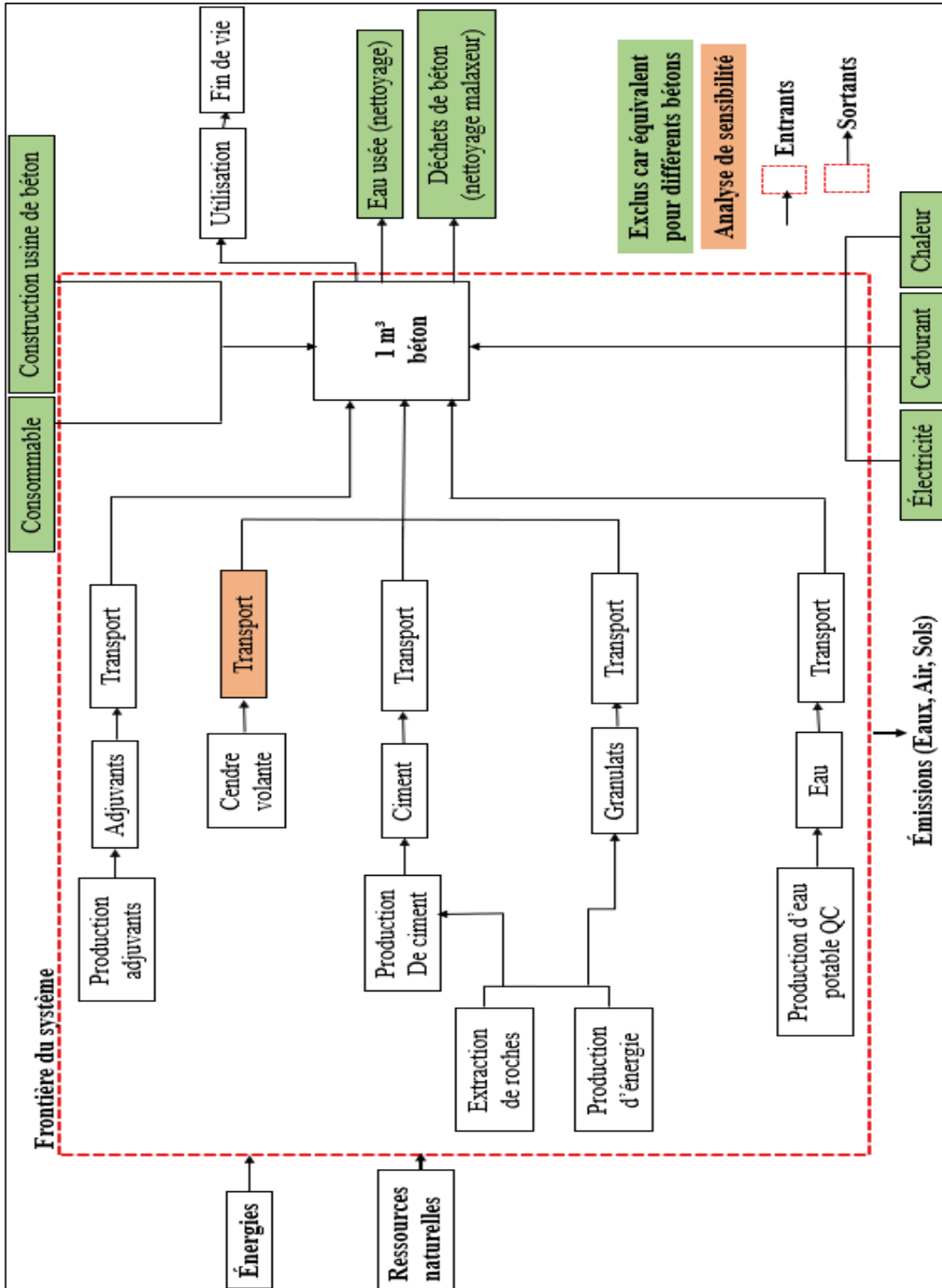


Figure 2.4 Frontière des systèmes de production de béton avec de la cendre volante

Tableau 2.4 Flux entrants et sortants utilisés pour fabriquer le béton avec le LCLL Ash

Flux entrants	Unités	Béton	Béton 5%LCLL Ash	Béton 10%LCLL Ash	Béton 15%LCLL Ash
Ciment	kg	350	333	315	298
Électricité	kWh	3,95	3,95	3,95	3,95
Gravier	kg	1105	1105	1105	1105
Plastifiant	kg	0,19	0,19	0,19	0,19
Sable	kg	776	776	776	776
Eau	kg	157	157	157	157
LCLL Ash	kg		17,5	35	52,5
Flux sortant = Fonction					
Un mètre cube (1 m <sup>3</sup> ) de béton de 35 MPa					

Tableau 2.5 Flux entrants et sortants utilisés pour fabriquer le béton avec la cendre volante

Flux entrants	Unités	Béton	Béton 5%CV	Béton 10%CV	Béton 15%CV
Ciment	kg	350	333	315	298
Électricité	kWh	3,95	3,95	3,95	3,95
Gravier	kg	1105	1105	1105	1105
Plastifiant	kg	0,19	0,19	0,19	0,19
Sable	kg	776	776	776	776
Eau	kg	157	157	157	157
Cendre volante	kg		18	35	53
Flux sortant = Fonction					
Un mètre cube (1 m <sup>3</sup> ) de béton de 35 MPa					

Le processus utilisé pour modéliser ces différents flux est le processus désagrégé. Le choix de ce type de processus est pour identifier dans l'étude les contributions de chacun des processus élémentaires de façon détaillée dans le système de produit associé à la production du produit étudié en faisant une analyse de contribution. Les flux du LCLLAsh et de la cendre volante sont déjà présents dans la base de données Ecoivent. Les données sur les distances de transport entre les différentes usines de fabrication des matériaux font partie également des flux entrants au niveau des frontières de système (Tableau 2.6).

Les distances ont été calculées (en km) entre chaque usine de production du matériau et leurs livraisons sont faites directement à l'usine de production du béton (Béton provincial Québec).

Tableau 2.6 Flux entrants basés sur le transport avec la liste des compagnies fournisseurs de matériaux de construction

<b>Lieux</b>	<b>Matériaux transportés</b>	<b>Moyens de transport</b>	<b>Distance en km</b>
Carrière gestion 4 Michaud et Frères Inc, 341 rue des forges, Amqui (Qc) et calcaire : Carrière Montréal-Est, 9990 Métropolitain Est	Ciment (argile et calcaire)	Camion	645 (639 +6,3)
5606 Arthur Sauvé Mirabel, J7N2Z9, Qc	Gravier	Camion	78
PSC, 9711 rue Colbert, Anjou	Plastifiant	Camion	8,8
2481 Rang St Charles, St Angèle de prémont, J0K 1R0	Sable	Camion	107
Usine Alumine Saguenay Lac Saint Jean Grande Baie, Rio Tinto, 5000 rte du petit parc, Labaie	LCLL Ash	Camion	466
Usine Alumine Saguenay Lac Saint Jean Grande Baie, Rio Tinto, 5000 rte du petit parc, Labaie	LCLL Ash calciné	Camion	466
89013 Gioia Tauro, Reggio de calabre, Italie	Cendre volante	Bateau	7758
1558 rue Main Belledune, E8G2M3, New Brunswick	Cendre volante	Camion	816
Estevan, SK S4A 2A6, Canada	Cendre volante	Camion	2758
WV-62, Letart, WV 25253	Cendre volante	Camion	1381

## 2.2 Matériel

Pour préparer les échantillons de béton, les différents composants sont mélangés dans une bétonnière jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène. Cette étude consiste à effectuer des tests de mesures au laboratoire afin de confirmer les meilleures recettes et leurs performances mécaniques.

La production du béton au laboratoire de l'ÉTS a nécessité l'utilisation des composants résumés dans les Tableau 2.7 et Tableau 2.8. Les bétons ont été fabriqués à partir de la recette de l'usine de béton (Béton provincial de Québec).

Les échantillons fabriqués sont :

- ✓ Le béton de référence (béton normal),
- ✓ Les bétons avec 5, 10, et 15 % de LCLL Ash (Tableau 2.4),
- ✓ Les bétons avec 5, 10, et 15 % de cendre volante (Tableau 2.5).

Les bétons fabriqués sont divisés entre 63 moules cylindriques, soit 9 moules pour chaque mélange. Les mélanges sont fabriqués en respectant la norme CSA. Les différentes gâchées ont été fabriquées en respectant les exigences de la fabrication d'un béton prêt à l'emploi selon la norme CSA A23.2-F19 (CSA, 2019b). La fabrication du béton exige l'emploi des matériels de fabrication au laboratoire comme les bétonnières, les moules, les liseuses, la règle, et la tige métallique.

### **2.2.1 Préparation des moules**

L'étape préliminaire consiste à utiliser et préparer les moules cylindriques en plastiques de taille 4" x 8" avant le gâchage du béton (Figure 2.5). Ces moules doivent être graissés avec de l'huile de décoffrage à l'aide d'un pinceau et des étiquettes circulaires placées au fond de chaque moule. Le but de ces étiquettes est de faciliter l'extraction des échantillons fabriqués. Les moules, une fois remplis avec du béton frais, sont placés sur une table et démoulés le lendemain.



Figure 2.5 Moules en plastique prévues pour le béton frais fabriqué

### 2.2.2 Composants et mélange

La préparation d'une gâchée de béton dans une bétonnière consiste à réaliser un mélange composé de ciment, de sable, de graviers, d'eau, de plastifiant, et de la cendre volante ou du LCLL Ash (Figure 2.6). Cette préparation est réalisée conformément à la norme CSA A23.2-3C (CSA, 2015b). La bétonnière utilisée est composée d'un malaxeur à tambour rotatif basculant.



Figure 2.6 Composantes pour la production expérimentale du béton

Chaque composant est déversé dans la bétonnière l'un après l'autre (Figure 2.7). Les granulats (graviers) de granulométrie 14-20 mm sont déversés en premier, les graviers moyens et fins de granulométrie 5-10 mm et 10-14 mm, sont déversés deuxièmement dans la bétonnière puis une partie de l'eau de gâchage est ensuite ajoutée. Le sable puis le ciment viennent ensuite compléter le mélange. L'eau de gâchage restante est mélangée avec le plastifiant, de type MasterGlenium 1466 et sont les derniers composants à être déversés dans la bétonnière. Une fois tous ces composants réunis, le mélange est effectué pendant 3 minutes, suivi d'un arrêt de 3 minutes et d'un second mixage de 2 minutes.



Figure 2.7 Bétonnière à tambour rotatif utilisé pendant les essais à l'ÉTS

À la fin du mélange, 5 L de béton sont prélevés pour des mesures de la teneur en air conformément à la norme CSA 23.2-4C (CSA, 2015c), 5 L pour des mesures d'affaissement réalisées selon la norme CSA 23.2-5C (CSA, 2015a) et le reste doit être déversé dans un récipient métallique puis réparti entre les moules prévus à cet effet. Le béton fabriqué est subdivisé entre les moules graissés au préalable. Les moules sont remplis manuellement en deux ou trois couches à l'aide d'une petite pelle ou d'une truelle à angle obtus conformément à la norme CSA A23.2-3C (CSA, 2015b). Les couches de béton sont pilonnées à l'aide d'une tige métallique en longeant les bords d'une manière symétrique afin de réduire la ségrégation des gros granulats au moment de la consolidation (Figure 2.8). La surface des moules déjà remplis de béton est aplatie avec une barre rigide pour enlever les dépressions



ainsi que les saillies et obtenir une surface plane. Les moules sont ensuite recouverts d'un plastique et déposés sur une table pendant 24 h avant le démoulage.



Figure 2.8 Tige métallique servant à pilonner la pâte

### 2.2.3 Démoulage et lissage du béton

Les démoulages des bétons se font un par un à l'aide d'un pistolet à air comprimé et ils sont extraits à l'aide de la pression d'air fournie par l'air comprimé. Après le démoulage, les surfaces des échantillons de bétons sont lissées avec une lisseuse mécanique de type Hikenma (Figure 2.9), avant que ces derniers ne soient conditionnés dans une chambre humide pour la conservation de l'humidité et de température.

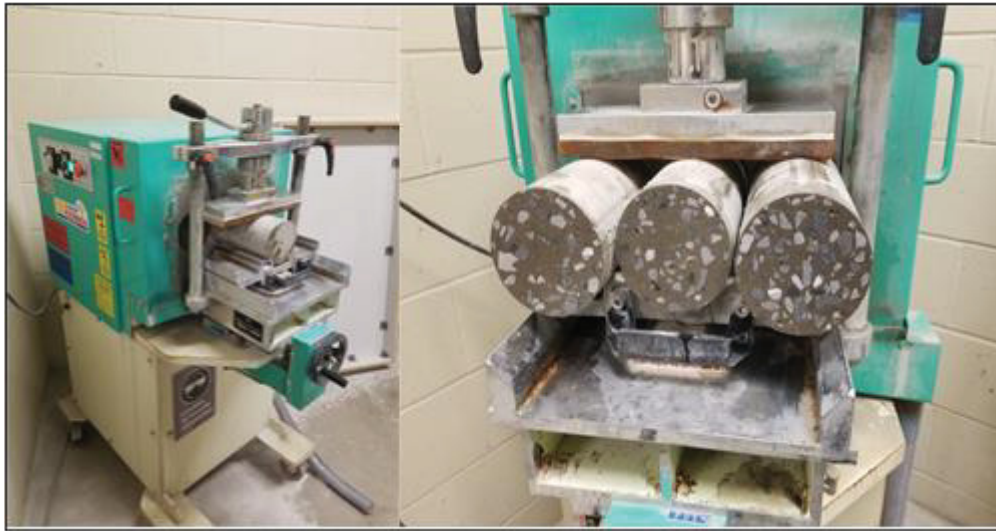


Figure 2.9 Lisseuse pour le sciage du béton après 24 h de cure avant conditionnement

#### 2.2.4 Préparation des échantillons de remblai

Les préparations des échantillons de remblai en pâte cimenté dans cette étude consistent à réaliser un assemblage des composantes des recettes dans un malaxeur de type Hobart. La production du remblai en pâte cimenté au laboratoire de l'ÉTS a nécessité l'utilisation des solides (résidus miniers ou RM), des liants (ciment, LCLL Ash et laitier de hauts fourneaux ou (slag-S)) et de l'eau. Les résidus miniers proviennent de la mine LaRonde qui est située dans la région d'Abitibi. Cette mine exploitée par l'entreprise manière Agnico-Eagle a fourni deux types de résidus miniers. Les premiers types de résidus proviennent de la zone 5 de la mine et sont appelés résidus LZ5. Les deuxièmes types de résidus viennent de l'usine de LaRonde et sont appelés LR. Les résidus miniers ont été mis dans des barils hermétiquement fermés et envoyés au laboratoire de l'ÉTS pour des travaux d'essais en laboratoire. Les liants sont le ciment GU (General Use) fourni par Ciment Québec, le laitier de hauts fourneaux ou laitier (scorie), provenant de Ciment Québec et le LCLL Ash fourni par la compagnie Rio Tinto. Le troisième composant est l'eau de mélange qui est directement puisée du robinet du laboratoire de l'ÉTS. Cette eau est utilisée pour faciliter le malaxage et rendre la pâte plus consistante et homogène.

Au niveau des mines, l'eau utilisée pour préparer le remblai en pâte cimenté est généralement de l'eau interstitielle, parfois l'eau du robinet est utilisée. L'eau interstitielle est l'eau issue des résidus filtrés issus du traitement du minerai.

Cette eau, une fois puisée des résidus miniers, est ensuite filtrée. Le résidu et l'eau sont malaxés pendant une minute, le ciment GU est ensuite ajouté avec le LCLL Ash ou le laitier de hauts fourneaux.

#### **2.2.4.1 Malaxage des composants**

Cette étape consiste à déverser les composants de la recette dans le malaxeur de marque Hobart et les mélanger avec l'eau du robinet (Figure 2.10). Ce malaxeur est typique des malaxeurs utilisés au laboratoire pour la fabrication des remblais et des matériaux de recettes semblables au remblai. Il est muni d'une tige en forme d'ancre qui fait des mouvements de rotation dans une cuve en acier d'environ 30 L. Les composants de la recette du remblai sont mélangés pendant 2 minutes dans cette cuve afin d'avoir une pâte homogène. La procédure de préparation des échantillons pour que le mélange atteigne la bonne consistance mécanique est faite selon la norme American Society for Testing and Materials ASTM C305 (ASTM, 2014) et pour la fabrication des cubes ainsi que les quantités de matériaux requises est la norme ASTM C109/109M-16a (ASTM, 2016).



Figure 2.10 Malaxeur du mélange des composants de remblai

#### 2.2.4.2 Mise en forme des échantillons de remblai

Des moules en acier inoxydable, de taille 2" po (soit 50.8 x 50.8 mm<sup>2</sup>) sont utilisés pour la mise en forme des échantillons (Coussy, 2011) (Figure 2.11). Lorsque la pâte devient homogène, elle est partagée entre ces moules et ils sont couverts d'un plastique pour mieux conserver l'humidité pour une cure de temps de 24 h sur une table au laboratoire.



Figure 2.11 Le type de moule utilisé dans la fabrication du remblai à l'ÉTS

## 2.2.5 Récapitulatif des échantillons préparés

### 2.2.5.1 Les bétons préparés

Les quantités des différents composants de béton et de remblai en pâte cimenté sont calculées avant de commencer les travaux au laboratoire et sont résumés dans les Tableau 2.7, Tableau 2.8, Tableau 2.9.

Tableau 2.7 Formulations de bétons (1 m<sup>3</sup>) avec du LCLL Ash

Matériaux	Unités	Béton référence	Béton 5 % LCLL Ash	Béton 10 % LCLL Ash	Béton 15 % LCLL Ash
Ciment	kg	350	333	315	298
LCLL Ash	kg	0	17,5	35	52,5
Sable	kg	776	776	776	776
Pierre 5-10 mm	kg	575	575	575	575
Pierre 10-14 mm	kg	211	211	211	211
Pierre 14-20 mm	kg	269	269	269	269
Eau	kg	157	157	157	157
Superplastifiant	kg	0,37	0,37	0,37	0,37

Tableau 2.8 Formulations de bétons (1 m<sup>3</sup>) avec de la cendre volante

Matériaux	Unités	Béton référence	Béton 5 % CV	Béton 10 % CV	Béton 15 % CV
Ciment	kg	350	333	315	298
Cendre volante	kg	0	17,5	35	52,5
Sable	kg	776	776	776	776
Pierre 5-10 mm	kg	575	575	575	575
Pierre 10-14 mm	kg	211	211	211	211
Pierre 14-20 mm	kg	269	269	269	269
Eau	kg	157	157	157	157
Superplastifiant	kg	0,37	0,37	0,37	0,37

Tableau 2.9 Formulations des remblais fabriqués au laboratoire de l'ÉTS

<b>Matériaux</b>	<b>60%RM+20%LCLL Ash+20%GU (g)</b>	<b>80%RM+20%GU (g)</b>
<b>Ciment GU</b>	26,6	26,6
<b>Slag</b>	79,8	106
<b>LCLL Ash</b>	26,6	0
<b>Résidus LaRonde</b>	2129	2126
<b>Résidus LZ5</b>	532	531
<b>Eau</b>	1141	1140

### 2.2.6 Conditionnement des échantillons

La chambre humide est un lieu de stockage des échantillons de béton à l'ÉTS muni de plusieurs plaques de support sous forme d'étagère en plastique. Cette chambre humide possède un taux d'humidité de 100 % et une température variante comprise entre 20 et 23 °C (Figure 2.12). Après 24 h sur la table et recouverts de plastique, les échantillons sont démoulés et entreposés dans la chambre humide avant le jour des différents tests. Au total, 26 moules sont préparés soit 12 échantillons pour chaque mélange (100%GU, 60 % S-20% LCLL Ash-20%GU et 80%S-20%GU). Les bétons sont enlevés de la chambre humide afin de prendre les mesures à 7, 28, et 56 jours.



Figure 2.12 Chambre humide pour des temps de cure des échantillons de béton avant les mesures de résistances à la compression

## 2.3 Méthodes de caractérisation physico-mécaniques

### 2.3.1 Résistance à la compression

Les mesures sont faites avec un testeur de compressions uniaxiales de marque MATEST, de cellule 2000 kN, de vitesse 2 kN/s et de seuil de déformation 7854 mm<sup>2</sup> pour le béton (Figure 2.13) et une cellule de 500 kN avec une vitesse de 2000 kN/s pour le remblai (Figure 2.14). Les types de testeur utilisés sont conçus pour tester les échantillons de formes cylindriques ou cubiques. L'appareil est muni d'une presse électromécanique rigide qui sert à retenir les échantillons cylindriques de béton et cubiques du remblai pour mesurer leurs résistances. L'échantillon est placé au milieu, entre les deux plateaux, afin de lui faire subir une charge de compression à l'aide d'une presse électromécanique rigide. Le testeur est directement connecté à un ordinateur qui mesure les contraintes uniaxiales. Le principe des mesures de résistantes à la compression uniaxiale consiste à contrôler la qualité de la résistance mécanique du matériau et de confirmer que le matériau fabriqué respecte les résistances demandées. Les tests sont faits à 7, 28, et 90 jours et les mesures de résistantes à la compression uniaxiale sont réalisées sur les échantillons démoulés. Les mesures sont effectuées en conformité avec à la méthode d'essai CSA A23.2-9C (CSA, 2009b; Dumeignil & Jacques, 2023).

À chaque âge d'essai, trois échantillons sont utilisés pour faire des mesures de résistance à la compression. L'apparition des fissures sur l'échantillon montre l'arrêt immédiat du testeur afin d'avoir la résistance mesurée. Chaque valeur de résistance à la compression uniaxiale ou UCS représente la moyenne de trois essais.

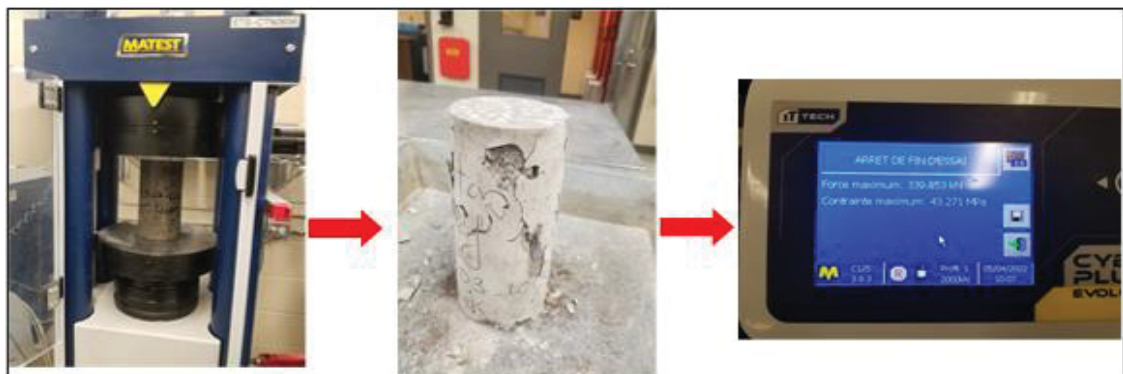


Figure 2.13 Mesure de la résistance à la compression du béton à l'ÉTS

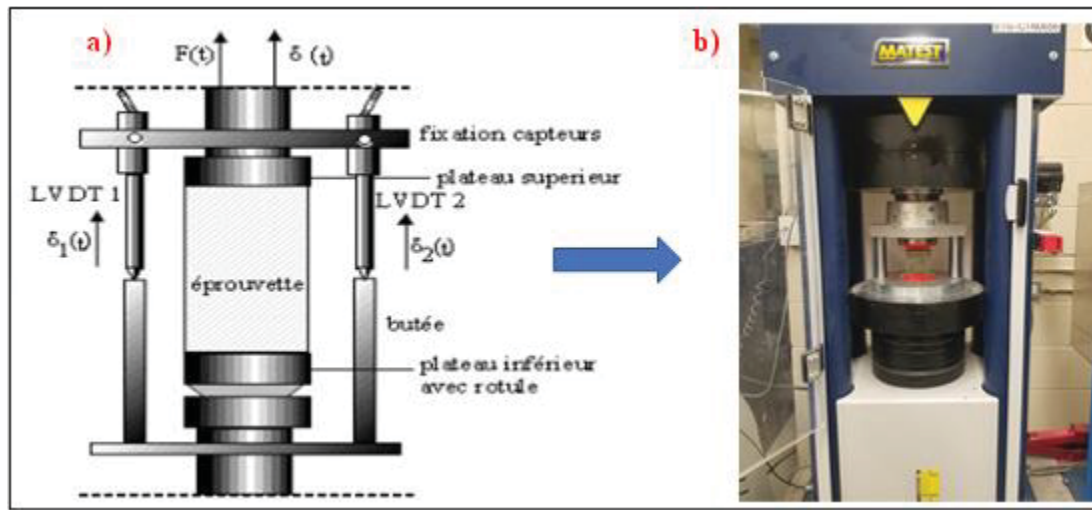


Figure 2.14 Testeur de compressions uniaxiales (a) (Belaoura & Brara, 2020) et (b) mesure de la teneur à l'ÉTS

### 2.3.2 Teneur en air

Cette mesure se fait à l'aide d'un aéromètre qui est un appareil utilisé pour déterminer le pourcentage d'air contenu dans un mélange de béton frais. Son utilisation consiste à envoyer une pression d'air au volume connu du béton afin de comprimer l'air qui se trouve dans les pores et l'expulser, sous forme de bulles d'air. L'aéromètre utilisé dans cette étude est l'aéromètre manuel de type Watts auquel est suspendu un bourroir constitué d'une tige en acier rond de diamètre  $16 \pm 1$  mm. Il est muni d'un maillet en caoutchouc ou en cuir dont le poids est  $0,6 \pm 0,3$  kg. L'appareil possède une aiguille vibrante de diamètre supérieur à 40 mm, qui émet des vibrations externes de fréquence vibratoire d'au moins 60 Hz, et d'une valve qui contrôle la quantité d'air de l'appareil de mesure avant le pompage. L'appareil est muni d'un manomètre dont le cadran est d'une grandeur suffisante afin de pouvoir effectuer des lectures directes à au moins 0,2 % près. Ces lectures concernent les volumes d'air ordinaires dont les valeurs sont comprises entre 0 et 8 %. L'appareil possède également un cylindre d'étalonnage qui a une capacité comprise entre 1 % et 6 % et une pompe manuelle pour laisser échapper l'air à la surface. L'aéromètre comprend un couvercle qui permet de fermer hermétiquement après le remplissage du récipient par du béton frais. L'aéromètre est rempli au début par du béton frais selon la norme CSA A23.2-6C basée sur la détermination de la masse volumique du béton. L'appareil est rempli jusqu'à son bord et ensuite lissé à l'aide d'une tige en acier.



Le rebord ainsi que le couvercle sont nettoyés avec un chiffon afin d'enlever tout restant de béton qui pourrait contribuer à la fuite d'air lorsque l'appareil est fermé. L'appareil est hermétiquement fermé, le robinet principal est aussi fermé, mais le robinet de purge reste ouvert. L'air est chassé en injectant de l'eau par le robinet et en expulsant les bulles d'air présentes dans le récipient. Après l'expulsion des bulles d'air, le pompage commence, l'air est pompé dans la chambre d'air et les deux robinets sont fermés pour éviter une fuite de pression. L'aiguille du manomètre est ramenée au point initial en laissant un peu d'air s'échapper de la chambre à air par le purgeur d'air. Une fois l'air libéré du récipient, l'aiguille du manomètre se déplace légèrement pour devenir immobile sur un chiffre qui est la teneur en air du béton.



Figure 2.15 Mesure de la teneur en air du béton frais

### 2.3.3 Affaissement

L'essai d'affaissement (concrete slump test) est un essai qui se fait grâce au cône d'Abrams et la procédure est effectuée selon la norme CSA 23.2-5C (CSA, 2015a). Il sert à déterminer la consistance de la pâte. Il est généralement réalisé avec du béton à l'état frais. Le principe consiste à utiliser le cône d'Abrams placé sur une surface plate, par exemple au sol, et rempli successivement en trois couches de volume équivalent. Les couches sont ensuite pilonnées à l'aide d'une tige en acier (Figure 2.15). La surface du cône est aplatie une fois le remplissage terminé. Le cône est retiré verticalement et l'affaissement du matériau est alors mesuré avec

une règle. Les mesures obtenues seront le taux d'affaissement de la pâte (S) en centimètre (cm), et le temps d'affaissement (T) en seconde (s).

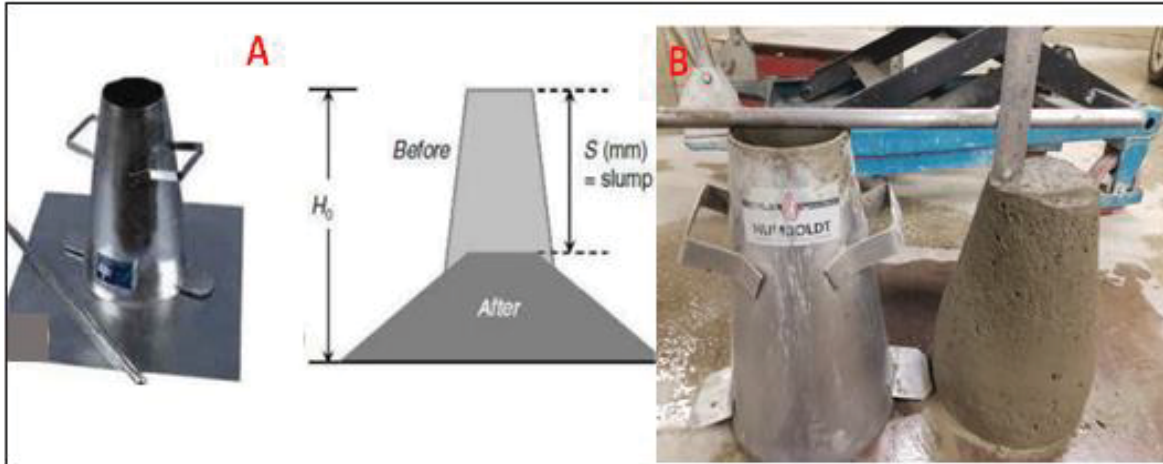


Figure 2.16 Principes de la mesure du cône d'Abrams ou concrete slump-test (A) (De Larrard & Ferraris, 1998), mesure de l'affaissement du béton à l'ÉTS (B)

### 2.3.4 Température

Les mesures des températures sont réalisées à l'aide d'un thermomètre d'immersion à tube dont la plage de mesure est comprise entre 0 °C et 50 °C. La température du béton frais est mesurée en immergeant le thermomètre pendant 5 à 10 minutes. Ces mesures ont été faites en suivant la norme CSA A23.2-17C (CSA, 2020).

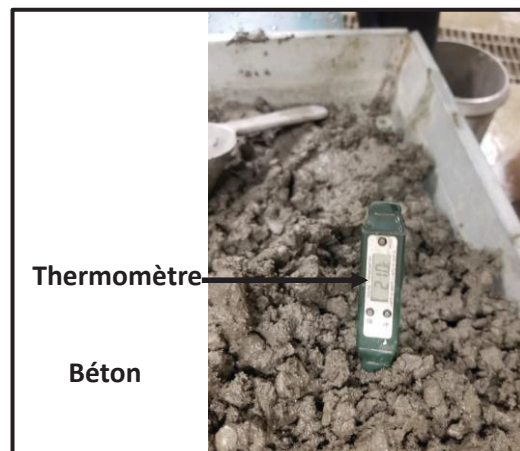


Figure 2.17 Mesure de la température du béton frais à l'aide d'un thermomètre

## CHAPITRE 3

### RÉSULTATS ET INTERPRÉTATIONS

#### 3.1 Analyse de cycle de vie du béton

##### 3.1.1 Analyse de comparaison

Cette analyse consiste à comparer en matière d'impacts environnementaux des différents types de bétons. Ces types de béton présentés comprennent 15 % de substitution de LCLL Ash, de LCLL Ash calciné ou de la cendre volante (transportée du Nouveau-Brunswick par camion). Les résultats des analyses de comparaisons pour 15 % sont résumés dans le (Tableau 3.1) pour les catégories d'impacts dont les valeurs d'impacts sont supérieures à 1,5. Les catégories d'impacts qui présentent des impacts inférieurs à 1,5 se trouvent dans l'annexe II.

Tableau 3.1 Comparaisons des types de bétons fabriqués avec 15 % de LCLL Ash, de LCLL Ash calciné et de cendre volante

<b>Catégorie d'impacts</b>	<b>Béton</b>	<b>B_LCLL Ash</b>	<b>B_LCLL Ash calciné</b>	<b>B_Cendre volante</b>
<b>Changement climatique (kgCO<sub>2</sub>eq)</b>	388	341	362	377
<b>Toxicité humaine (kg 1,4-DCB-Eq)</b>	53	49	50	52
<b>Épuisement des fossiles (kg oil-Eq)</b>	56	51	53	53
<b>Épuisement des métaux (kg Fe-Eq)</b>	6,0	5,6	5,7	5,8
<b>Rayonnement ionisants (kg U235-Eq)</b>	10,2	9,5	9,8	10,3
<b>Transformation naturelle des terres (m<sup>2</sup>)</b>	5,8	5,3	5,2	4,7

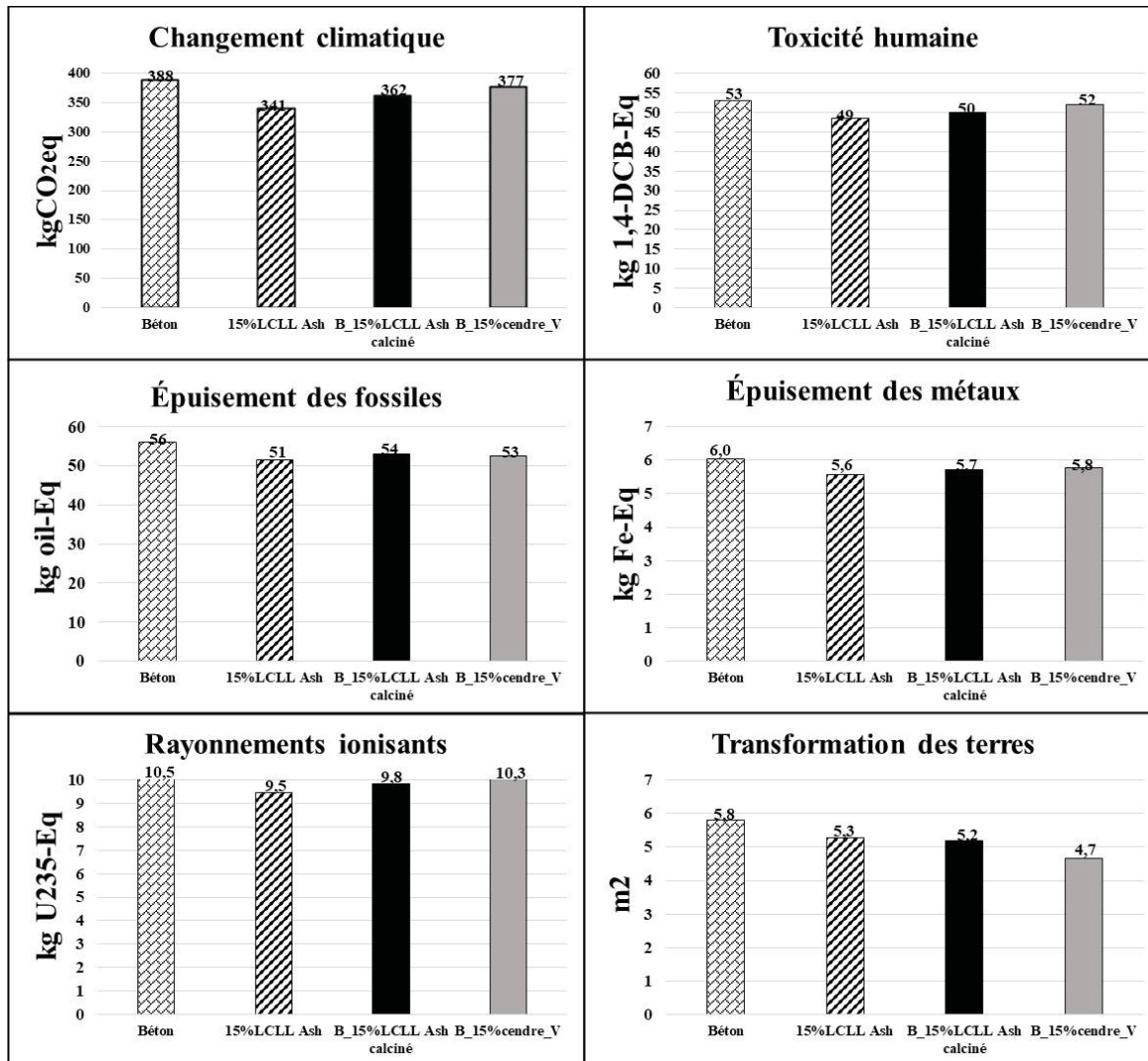


Figure 3.1 Comparaisons des bétons fabriqués avec du LCLL Ash, du LCLL Ash calciné et de la cendre volante

Les résultats représentés par la Figure 3.1 montrent que le béton ordinaire qu'est le béton de référence est le béton le plus impactant sur toutes les catégories d'impact comparativement aux autres types de bétons fabriqués. Au niveau du changement climatique, le béton ordinaire est le béton le plus impactant suivi du béton fabriqué avec de la cendre volante. Les bétons fabriqués avec le LCLL Ash calciné sont plus impactants que ceux fabriqués avec le LCLL Ash, la différence est de 21 kgCO<sub>2</sub>eq entre les deux types de bétons. Cette différence entre les deux produits est attribuée à l'étape de calcination du LCLL Ash qui génère plus d'impacts au cours de son processus.

Au niveau de la toxicité humaine, le béton fabriqué avec de la cendre volante est le béton le plus impactant. Son impact est plus grand que le béton fabriqué avec du LCLL Ash ou du LCLL Ash calciné (avec des différences mineures respectives de 3,5 kg 1,4-DCB-Eq et 2 kg 1,4-DCB-Eq).

L'épuisement des métaux ne génère pas de grande différence entre les impacts des différentes recettes de bétons (les impacts respectifs sont 6,03 kg Fe-Eq pour le béton ordinaire, 5,6 kg Fe-Eq pour le LCLL Ash, 5,7 kg Fe-Eq pour le LCLL Ash calciné et 5,8 kg Fe-Eq pour la cendre volante). Quant à l'épuisement des fossiles, les différences entre les impacts sont assez mineures, le bétons fabriqué avec LCLL Ash calciné est moins impactant que le béton ordinaire mais présente plus d'impacts comparativement au béton fabriqué avec du LCLL Ash et de la cendre volante. Pour les rayonnements ionisants, les impacts varient entre 9,5 et 10,3 kg U<sup>235</sup>-E et le béton fabriqué avec de la cendre volante est plus impactant avec un impact généré de 10,3 kg U<sup>235</sup>-Eq que le béton fabriqué avec du LCLL Ash calciné et celui fabriqué avec du LCLL Ash. Au niveau de la transformation des terres, les impacts varient entre 4,7 et 5,8 m<sup>2</sup> au niveau des recettes de béton, mais le béton fabriqué avec du LCLL Ash est le plus impactant que le béton fabriqué avec le LCLL Ash calciné et celui fabriqué avec de la cendre volante avec une différence mineure de 0,10 m<sup>2</sup> avec le béton fabriqué avec du LCLL Ash calciné et 0,62 m<sup>2</sup> avec celui fabriqué avec de la cendre volante.

Les résultats trouvés à travers l'analyse de comparaison montrent que les utilisations du LCLL Ash et du LCLL Ash calciné présentent un avantage environnemental par rapport à la cendre volante dans la production du béton. Certains travaux de la littérature confirment ce bénéfice environnemental de la substitution du ciment par les matériaux cimentaires supplémentaires. Les travaux réalisés par Bautista et al. en 2022 ont confirmé que l'argile calcinée utilisée comme matériaux cimentaires supplémentaires (MCS) pour remplacer des proportions de ciment Portland ordinaire (OPC) dans le béton permet de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> et pourrait entraîner une diminution de 4 à 7 % pour les émissions de CO<sub>2</sub> eq et une diminution de 2 à 4 % les valeurs de PM 2,5 eq (Bautista, Ongpeng, & Razon, 2022). De plus, les travaux de Teklay et al. en 2014 ont également montré que l'argile calcinée est un matériau prometteur pour la réduction de CO<sub>2</sub> dans la fabrication de béton (Teklay, Yin, Rosendahl, & Bøjer, 2014). D'autres auteurs confirment que les argiles calcinées sont des matériaux potentiels

pour produire des ciments écologiques (ciments verts) qui peuvent être utilisés dans le béton afin de réduire les émissions de CO<sub>2</sub> (Shvarzman, Kovler, Grader, & Shter, 2003; Tironi, Trezza, Scian, & Irassar, 2012). Tous ces travaux de la littérature confirment que les résultats trouvés au niveau de cette analyse de comparaison concordent avec ceux de la littérature. L'ajout du LCLL Ash et du LCLL Ash calciné dans la recette du béton présente moins d'impact environnemental que le béton fabriqué avec de la cendre volante.

### 3.1.2 Analyse de contribution

Grâce aux simulations réalisées dans cette étude, les contributions des catégories d'impact sélectionnées ont été obtenues lorsque 15 % de LCLL Ash, de LCLL Ash calciné et de cendre volante sont utilisés dans la production du béton (Tableau 3.2 à Tableau 3.7).

Tableau 3.2 Contribution des bétons normaux, bétons fabriqués avec de la cendre volante, du LCLL Ash et du LCLL Ash calciné au niveau du changement climatique

Matériaux	Unités	Béton	B_15LCLL Ash	B_15LCLL Ash calciné	B_15CV
Ciment	%	85	82	77	74
Gravier	%	3,3	3,7	3,5	3,4
Sable	%	2,8	3,2	3,0	2,9
Électricité	%	0,01	0,01	0,01	0,01
Eau	%	0,01	0,01	0,01	0,01
Plastifiant	%	0,13	0,15	0,14	0,13
Transport par camion	%	9,2	10,2	9,6	7,4
LCLL Ash	%		0,7		
LCLL Ash calciné	%			6,5	
Cendre volante	%				12,1
Total	%	100	100	100	100

Tableau 3.3 Contribution des bétons normaux, bétons fabriqués avec de la cendre volante, du LCLL Ash et du LCLL Ash calcinés au niveau de la toxicité humaine

Matériaux	Unités	Béton	B_15LCLL Ash	B_15LCLL Ash calciné	B_15C_V
Ciment	%	62	58	56	54
Gravier	%	7,8	8,5	8,2	7,9
Sable	%	6,6	7,3	7,1	6,8
Électricité	%	0,1	0,1	0,1	0,1
Eau	%	0,04	0,05	0,05	0,05
Plastifiant	%	0,36	0,40	0,39	0,37
Transport par camion	%	23,0	24,6	23,9	18,4
LCLL Ash	%		1,52		
LCLL Ash calciné	%			4,1	
Cendre volante	%				12,6
Total	%	100	100	100	100

Tableau 3.4 Contribution des bétons normaux, bétons fabriqués avec de la cendre volante, du LCLL Ash et du LCLL Ash calciné au niveau de l'épuisement des métaux

Matériaux	Unités	Béton	B_15LCLL Ash	B_15LCLL Ash calciné	B_15C_V
Ciment	%	59	49	48	48
Gravier	%	7,7	16,0	15,7	15,6
Sable	%	6,7	13,8	13,5	13,3
Électricité	%	0,01	0,17	0,17	0,17
Eau	%	0,2	0,2	0,2	0,2
Plastifiant	%	0,5	0,4	0,4	0,4
Transport par camion	%	26	19,0	19	15
LCLL Ash	%		1,2		
LCLL Ash calciné	%			3,6	
Cendre volante	%				8,2
Total	%	100	100	100	100

Tableau 3.5 Contribution des bétons normaux, bétons fabriqués avec de la cendre volante, du LCLL Ash et du LCLL Ash calciné au niveau de l'épuisement des fossiles

Matériaux	Unités	Béton	B_15LCLL Ash	B_15LCLL Ash calciné	B_15CV
Ciment	%	54	54,5	53	53,4
Gravier	%	14,8	8,4	8,2	8,2
Sable	%	12,8	7,2	7	7,1
Électricité	%	0,2	0,01	0,01	0,01
Eau	%	0,2	0,02	0,02	0,02
Plastifiant	%	0,4	0,6	0,6	0,6
Transport par camion	%	18,1	27,6	26,7	21,7
LCLL Ash	%		1,7		
LCLL Ash calciné	%			4,8	
Cendre volante	%				9,0
Total	%	100	100	100	100

Tableau 3.6 Contribution des bétons normaux, bétons fabriqués avec de la cendre volante, du LCLL Ash et du LCLL Ash calciné au niveau des rayonnements ionisants

Matériaux	Unités	Béton	B_15LCLL Ash	B_15LCLL Ash calciné	B_15C_V
Ciment	%	52	47	45,5	43
Gravier	%	10,7	11	11,0	10,5
Sable	%	9,4	10,1	9,7	9,3
Électricité	%	0,3	0,3	0,29	0,3
Eau	%	0,02	0,03	0,02	0,02
Plastifiant	%	0,4	0,4	0,4	0,4
Transport par camion	%	28	29	28	21,3
LCLL Ash	%		1,8		
LCLL Ash calciné	%			5,2	
Cendre volante	%				15
Total	%	100	100	100	100



Tableau 3.7 Contribution des bétons normaux, bétons fabriqués avec de la cendre volante, du LCLL Ash et du LCLL Ash calciné au niveau de la transformation naturelle des terres

Matériaux	Unités	Béton	B_15LCLL Ash	B_15LCLL Ash calciné	B_15C V
Ciment	%	10,0	8,6	8,6	8,7
Gravier	%	40,1	40,6	40,5	40,8
Sable	%	34,5	35,0	34,9	35,2
Électricité	%	10,2	10,4	10,3	10,4
Eau	%	0,2	0,2	0,2	0,2
Plastifiant	%	0,1	0,1	0,1	0,1
Transport par camion	%	4,9	4,8	4,8	3,9
LCLL Ash	%		0,3		
LCLL Ash calciné	%			0,6	
Cendre volante	%				0,6
Total	%	100	100	100	100

Les résultats de cette analyse appliquée à la fabrication des différents mélanges de béton sont représentés par la Figure 3.2.

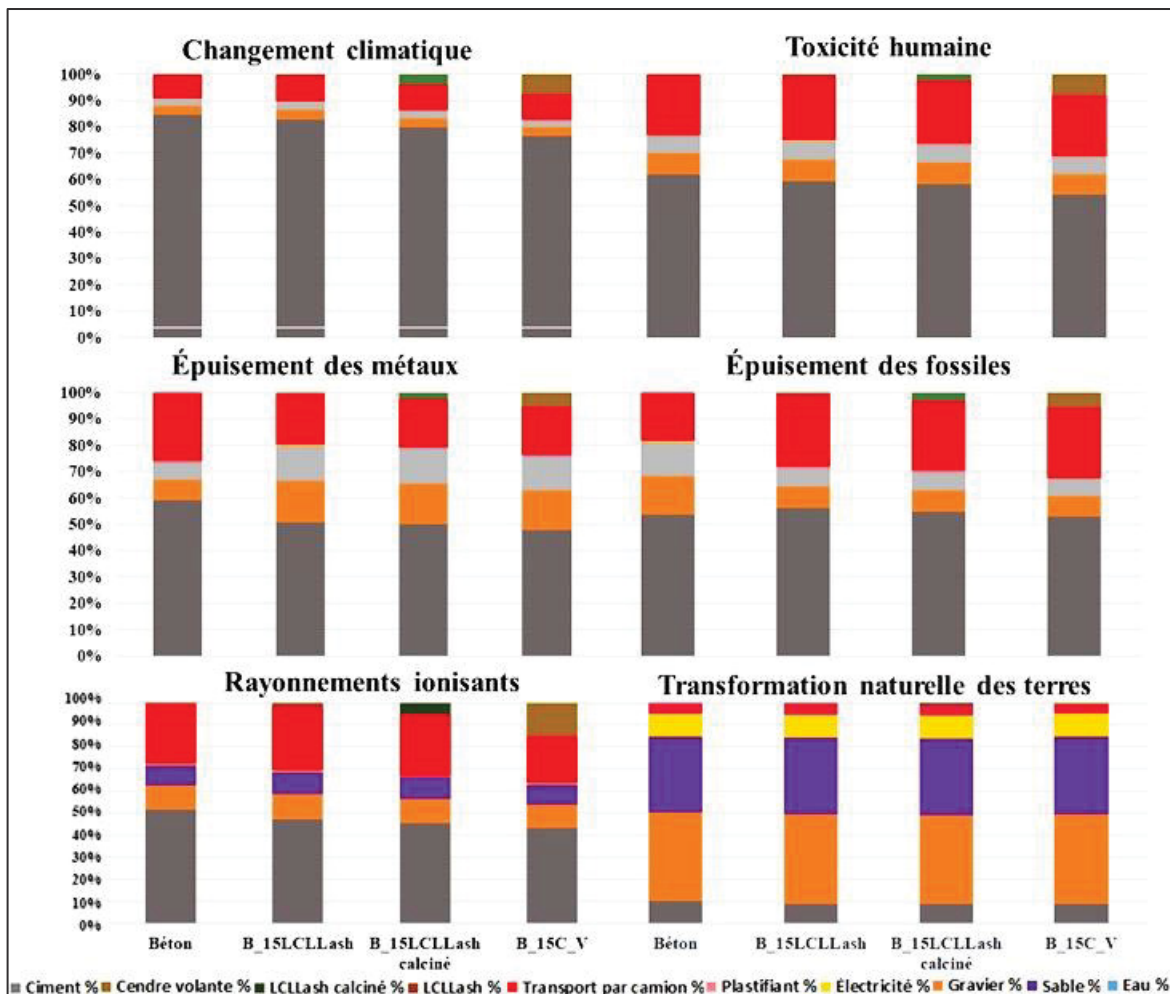


Figure 3.2 Contribution des bétons normaux, bétons fabriqués avec de la cendre volante et du LCLL Ash calciné

Le ciment est le plus grand contributeur aux impacts dans la recette du béton au niveau des catégories d'impacts sauf au niveau de la transformation des terres naturelles où les forts impacts sont produits par le gravier et le sable. La plus grande contribution du ciment se trouve au niveau du changement climatique avec 85 % au niveau du béton de référence et sa plus faible contribution est 74% dans le béton fabriqué avec de la cendre volante. Le deuxième facteur le plus contributeur est le transport par camion dont la contribution est comprise entre 9,2 % et 26 %. Quant aux LCLL Ash et LCLL Ash calciné, leurs plus grandes contributions sont remarquables au niveau des rayonnements ionisants et du changement climatique. Leurs plus faibles contributions se situent au niveau de la transformation naturelle des terres soit 0,3% pour le LCLL Ash et 0,63% pour le LCLL Ash calciné. Les résultats trouvés

montrent que le LCLL Ash et le LCLL Ash calciné contribuent moyennement, voir faiblement, aux impacts environnementaux comparativement au ciment, au transport, au gravier et au sable pour la fabrication du béton.

### 3.1.3 Analyse de sensibilité

L'analyse de sensibilité est une analyse qui vérifie la robustesse des résultats finaux et des conclusions d'une analyse de cycle de vie. Les études de sensibilité effectuées dans ce mémoire sont basées sur les hypothèses du taux de substitution, du transport de la cendre volante et de la température de calcination du LCLL Ash.

#### 3.1.3.1 Variation du taux de substitution

Les émissions d'un mètre cube ( $1 \text{ m}^3$ ) de béton fabriqué avec du LCLL Ash et du LCLL Ash calciné sont réalisées et représentées dans les (Tableau 3.8) et (Figure 3.3).

Tableau 3.8 Impacts sur le changement climatique des bétons fabriqués avec du béton (100 % ciment), 5 %, 10 % et 15 % de LCLL Ash, et de LCLL Ash calcinés

Matériaux	Unités	Béton	LCLL Ash			LCLL Ash calciné		
		100%	5%	10%	15%	5%	10%	15%
Ciment	kgCO <sub>2</sub> eq	329	312	296	279	312	296	279
Gravier	kgCO <sub>2</sub> eq	12,7	12,7	12,7	12,7	13,3	12,7	12,7
Sable	kgCO <sub>2</sub> eq	10,9	10,9	10,9	10,9	9,3	10,9	10,9
Électricité	kgCO <sub>2</sub> eq	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04
Eau	kgCO <sub>2</sub> eq	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03
Plastifiant	kgCO <sub>2</sub> eq	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
LCLL Ash	kgCO <sub>2</sub> eq		0,8	1,6	2,4			
LCLL Ash calciné	kgCO <sub>2</sub> eq					7,8	15,7	23,5
Transport par camion	kgCO <sub>2</sub> eq	35,6	35,4	35,1	34,8	35,4	35,1	34,8

Les diagrammes ci-dessous montrent les différentes quantités d'émissions au moment de la production des différents mélanges de béton. Cette étude basée sur les émissions de CO<sub>2</sub> a permis de faire une comparaison entre les types de bétons fabriqués.

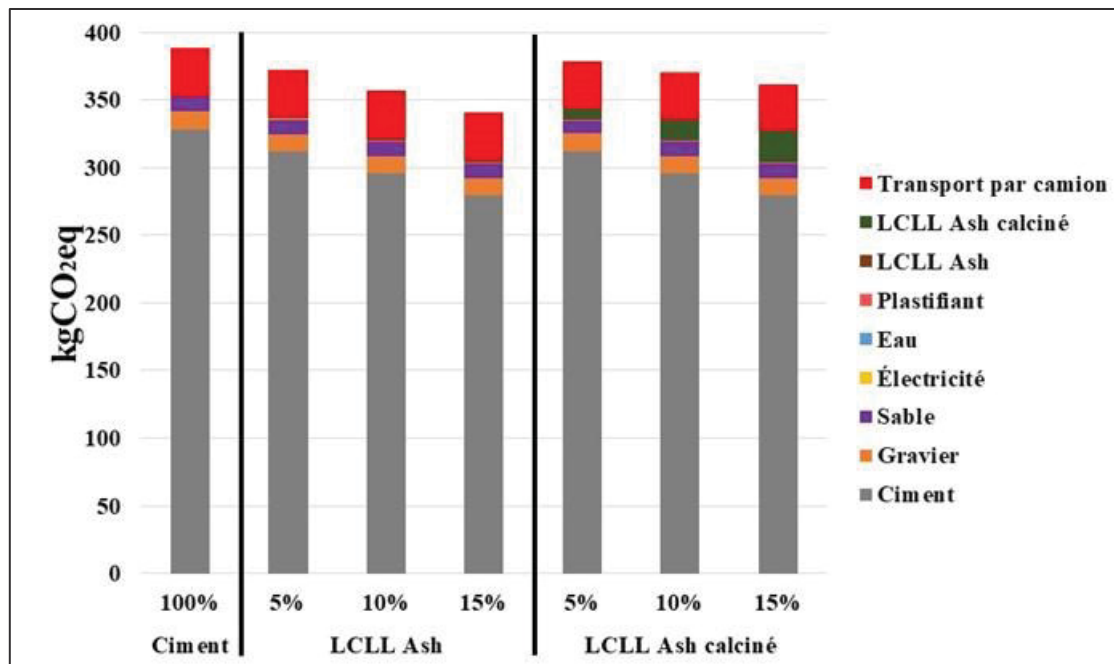


Figure 3.3 Résultats des empreintes de carbone de bétons fabriqués avec du LCLL Ash et du LCLL Ash calciné (à des taux de substitution de 5, 10 et 15 %)

Les mêmes conclusions que précédemment sont observées : le ciment est le facteur qui émet le plus de gaz à effet de serre, suivi par le transport par camion. L'eau et le plastifiant sont des éléments qui ne génèrent que très peu d'impact. Le gravier et le sable présentent des émissions moyennes au niveau des différentes recettes. Leurs émissions sont comprises entre 12,7 et 13,3 kgCO<sub>2</sub>eq pour le gravier ; 10,9 et 9,3 kgCO<sub>2</sub>eq pour le sable. Les empreintes carbonées du LCLL Ash et du LCLL Ash calciné sont moyennes voir faibles (soit 0,7894 kgCO<sub>2</sub>eq pour le LCLL Ash).

### 3.1.3.2 Transport de la cendre volante

Les cendres volantes font partie des ajouts cimentaires qui se font de moins en moins disponibles au Canada, d'où la nécessité d'importer par voies maritime et terrestre des cendres volantes d'Italie jusqu'à l'usine de production de béton à Montréal. Pour réaliser cette analyse de sensibilité, deux scénarios ont été réalisés sur les distances et les moyens de transport des cendres volantes. Le premier scénario qui est le scénario de référence consiste à transporter la cendre volante à Montréal par camion, soit depuis le Nouveau-Brunswick (à 816 km), depuis le Saskatchewan (à 2758 km) ou depuis la Virginie (USA) (à 1381 km) (1), le deuxième

scénario est de transporter de la cendre volante par camion de l'usine de cendre volante de Milan (Italie) au port de Genoa (Italie) (à 173 km), du port de Gioia en Italie au port de Montréal au Canada (à 7563 km) par bateau, et du port de Montréal à l'usine de béton (béton provincial) par camion (à 22 km). Les paramètres les plus sensibles dans cette analyse de sensibilité sont la distance de transport ainsi que les moyens de transport. Les résultats obtenus en termes d'impact environnemental sont présentés dans le (Tableau 3.9).

Tableau 3.9 Résultats sur l'analyse de sensibilité sur le transport de la cendre volante

Scenarios	Origine	Moyens de transport	Impacts pour la fabrication d'un m3 de béton (kgCO <sub>2</sub> eq)
1er scénario	New Brunswick	Camion (816 km)	367
	Saskatchewan	Camion (2758 km)	397
	Virginie (USA)	Camion (1381 km)	388
2e scénario	Italie	Camion (Usine TKC-Port Milan) (173 km)	402
		Bateau (Port Milan-Port Montréal) (7563,39 km)	
		Camion (Port Montréal-Usine béton) (22 km)	

L'analyse de sensibilité basée sur le transport montre que les impacts générés lorsque le transport de la cendre volante se fait par camion pour fabriquer du béton présentent des valeurs qui se rapprochent beaucoup plus à celle de la cendre volante transportée par bateau depuis l'Italie, bien que la distance pour amener de la cendre volante depuis l'Italie soit grande (7563,39 km). Pour le futur, lorsque la demande de cendre volante sera importante au Québec, à part le New-Brunswick considéré comme le premier centre d'approvisionnement qui génère moins d'impacts, il faudra s'intéresser aux cendres volantes provenant de Virginie, ensuite de Saskatchewan au niveau du scénario 1. Quand il sera impossible de faire un approvisionnement de la cendre volante à travers le premier scénario, il serait idéalement intéressant d'aller chercher la cendre volante par bateau en l'Italie. Il est intéressant de noter que pour atteindre des impacts sur le changement climatique similaires au scénario 2 (import de cendre volante par bateau, soit 402 kgCO<sub>2</sub>eq), le transport par camion doit être équivalent à 4322 km.

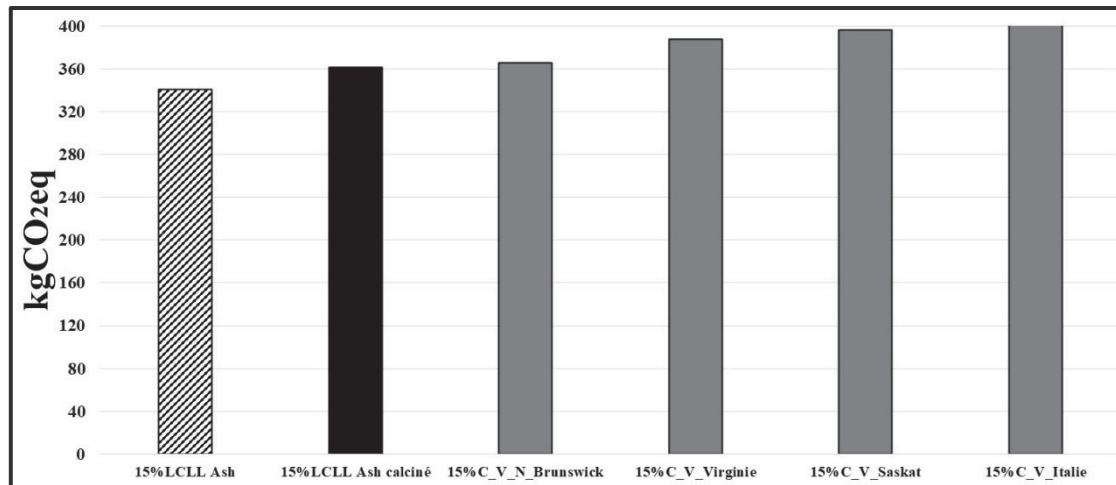


Figure 3.4 Comparaison des impacts environnementaux des types de béton : cas pour les types de moyens de transport.

### 3.1.3.3 Température de calcination du LCLL Ash

Les travaux récents à l'ÉTS ont démontré que les brasques traitées présentent des propriétés similaires à celles d'une argile calcinée (Brial et al., 2021). Les argiles calcinées constituent une opportunité prometteuse pour réduire les quantités de ciments dans la production du béton. Ces argiles calcinées peuvent être utilisées comme matériaux cimentaires supplémentaires pour substituer le ciment afin de diminuer la quantité de CO<sub>2</sub> intrinsèque des matériaux de construction. Un premier projet réalisé à Cuba entre 2005 et 2009 a mis en évidence que l'une des pistes les plus prometteuses pour la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> dans la fabrication du béton réside dans l'utilisation d'argiles calcinées (Ramachandran, Paroli, Beaudoin, & Delgado, 2002). Pour réaliser cette analyse de sensibilité, les températures de calcination utilisées sont 800, 1000 et 1450 °C. L'étude a nécessité la réalisation de trois hypothèses. La première hypothèse est le béton fabriqué avec du LCLL Ash calciné à 800 °C comme une argile (1). La deuxième hypothèse est le béton fabriqué avec du LCLL Ash calciné à 1000 °C qui est une température intermédiaire entre l'argile et le clinker (2) et la troisième hypothèse est le béton fabriqué avec le LCLL Ash calciné à 1450 °C comme le clinker (3). Les résultats obtenus pour chaque température sont présentés dans le (Tableau 3.10).

Tableau 3.10 Résultats de la sensibilité sur la calcination

Température °C	800	1000	1450
Empreinte carbone/kgCO <sub>2</sub> eq	361,82	361,85	361,90

Les résultats des analyses de sensibilité réalisées montrent une différence mineure entre les valeurs trouvées des impacts. Cette faible variation entre les impacts est influencée par le choix des hypothèses en tenant compte des paramètres de la calcination (type de calcination comme la calcination stationnaire, la calcination éclair, le type de four comme le four rotatif à clinker, le four avec un système de récupération de chaleur, le four industriel ordinaire, le four à voie humide réaménagé pour la calcination des argiles, la quantité d'électricité, le matériel pour calciner comme le pétrole coke, les combustibles ordinaires, les combustibles pulvérisés, l'état des brasques soit humides ou sèches etc.). Les écarts de température choisis dans cette étude pour la calcination présentent des émissions semblables, voire même plus faibles que celles trouvées dans la littérature lorsque l'argile calcinée est utilisée dans la production du béton. Les études de Díaz et al. en 2017 ont utilisé 1 kg d'argile calcinée à des températures comprises entre 700 et 850 °C, une consommation d'électricité de 4 234 kJ, soit 1,176 kWh avec un four à clinker industriel comme four de calcination. Les auteurs ont obtenu des émissions équivalentes à 393 kgCO<sub>2</sub>eq. Les études de Guo et al. en 2022 viennent également confirmer les résultats de l'étude de sensibilité dans ce projet.

Leurs études démontrent que l'utilisation de l'argile calcinée apporte un grand potentiel d'atténuation des impacts environnementaux pour la production de béton. Plus le taux de remplacement de l'argile calcinée augmente, plus la diminution des émissions de carbone est importante (Guo et al., 2022). Ainsi, la diminution de la quantité de ciment et l'utilisation d'argile calcinée entraînent une baisse des émissions de CO<sub>2</sub>. Avec une utilisation jusqu'à 50 % d'argile calcinée au remplacement du ciment, les auteurs ont obtenu une empreinte carbone de 288 kgCO<sub>2</sub>eq. Une autre étude réalisée en 2018 par Scrivener et al. a montré des résultats prometteurs de l'utilisation de l'argile calcinée. Les auteurs ont utilisé une combinaison d'argile calcinée et de calcaire pour remplacer le clinker (K. Scrivener, Martirena, Bishnoi, & Maity, 2018). Cette combinaison (30 % d'argile calcinée, 15 % de calcaire et 5 % de gypse) remplaçait 50 % de clinker dans la production du béton. Les résultats obtenus en termes d'impact environnemental ont montré une réduction d'environ 30 % d'émissions de

CO<sub>2</sub> par rapport au béton fabriqué avec du ciment ordinaire et 10 % avec du béton fabriqué avec de la cendre volante.

En outre, l'utilisation du LCLL Ash calciné est une technique prometteuse pour contrer l'épuisement des ressources naturelles pour les matériaux de construction et constitue aussi un moyen efficace de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> liées à l'utilisation du ciment dans la production du béton.

### **3.2 Les performances mécaniques**

L'utilisation du LCLL Ash dans la fabrication du béton a montré des résultats prometteurs en termes d'impact environnemental dans les études d'analyse de cycle de vie. À travers ces résultats d'ACV, il a été nécessaire de réaliser des études basées sur les propriétés physico-mécaniques afin de savoir si la résistance mécanique du béton fabriqué avec le LCLL Ash répond aux normes d'un béton résistant. Dans cette partie, des mesures de résistances à la compression sont effectuées à 7 jours, 28 jours et 90 jours de temps de cure au laboratoire de l'ÉTS.

#### **3.2.1 Mesures des résistances à la compression**

Les résultats obtenus des différentes mesures de résistances à la compression des bétons fabriqués sont les résistances à la compression et les résistances relatives à la compression sont résumées au niveau des Figure 3.5 et Figure 3.6. Ces différentes mesures ont permis de tracer les diagrammes de résistances à la compression et de résistances relatives à la compression. Les valeurs des résistances à la compression du béton normal sont proches à celles des bétons fabriqués avec 5, 10 et 15 % de cendre volante. Les résistances à la compression des bétons fabriqués avec des brasques traitées sont un peu plus élevées que les bétons fabriqués avec de la cendre volante Figure 3.5 et Figure 3.6. Le LCLL Ash maintient la résistance à la compression du béton aux différents âges de durcissement (7 j, 28 j, et 90 j) et les différentes figures montrent que le béton fabriqué avec du LCLL Ash présente une résistance similaire au béton fabriqué avec de la cendre volante.

Cela met en évidence que l'utilisation du LCLL Ash est prometteur dans la production du béton comme ajout cimentaire.



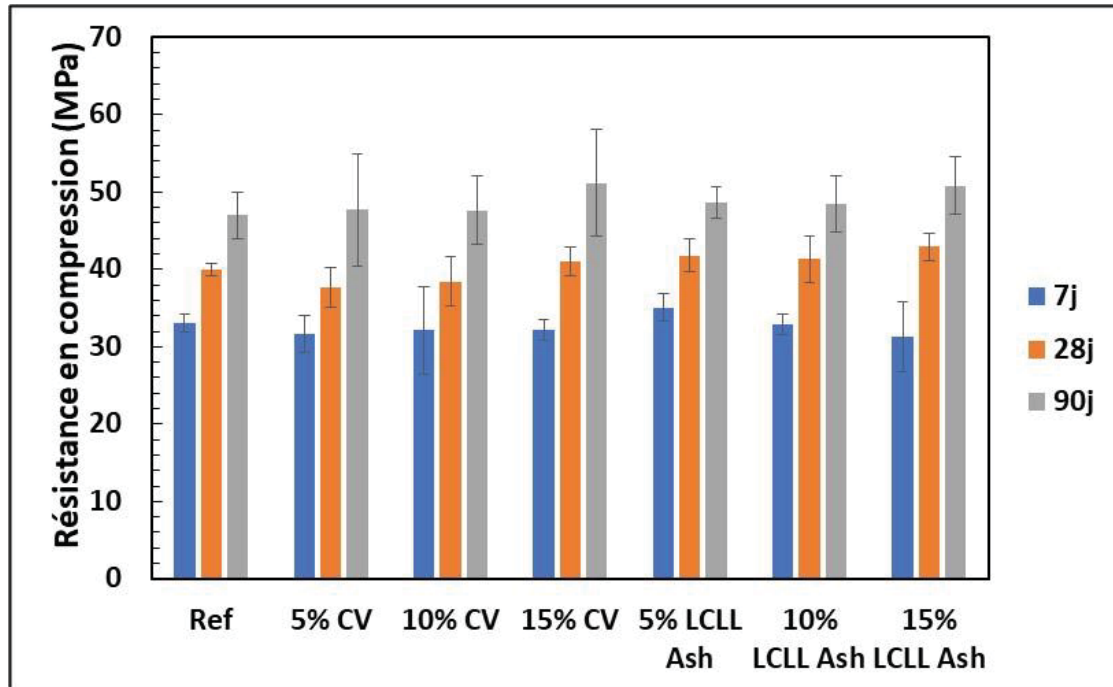


Figure 3.5 Comparaisons des résistances à la compression des bétons normaux, des bétons fabriqués avec du LCLL Ash et la cendre volante.

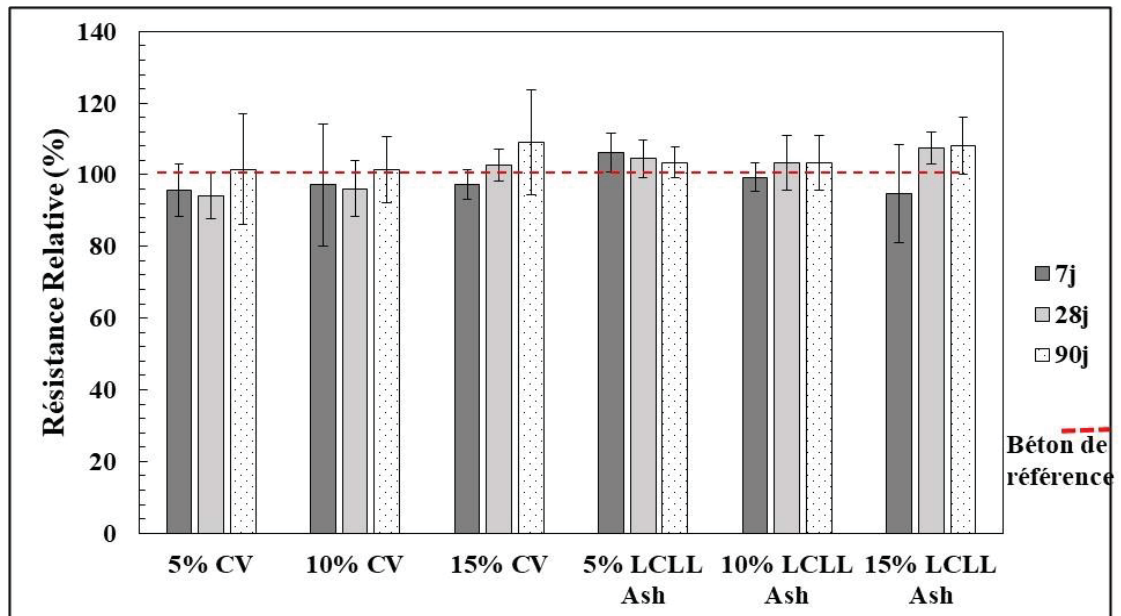


Figure 3.6 Comparaisons des résistances relatives des bétons normaux, des bétons fabriqués avec du LCLL Ash et la cendre volante

### 3.2.2 Mesures de la teneur en air, de l'affaissement et de la température

Les résultats des mesures de la teneur en air montrent que les bétons fabriqués présentent des teneurs dont les valeurs sont comprises entre 2,6 et 3,3 % pour le béton fabriqué avec le LCLL Ash, 2,5 et 3 % pour le béton fabriqué avec la cendre volante. Ces résultats sont inférieurs à la teneur en air d'un béton à l'état frais qui se situe généralement entre 5 et 8 % (ABQ, 2014). Quant à l'affaissement, il est compris entre 4,2 et 5,5 cm pour le béton fabriqué avec le LCLL Ash, 4,5 et 5,5 cm pour le béton fabriqué avec la cendre volante. Les résultats montrent que l'affaissement du béton fabriqué avec du LCLL Ash est inférieur à l'affaissement du béton fabriqué avec la cendre volante. Cela permet de confirmer que les ajouts des pourcentages (5 %, 10 % et 15 %) de la cendre volante apportent plus d'absorption d'eau de gâchage au moment de la fabrication du béton que les ajouts de (5 %, 10 % et 15 %) de LCLL Ash. Les températures mesurées sont comprises entre 19,8 et 20,8 °C pour le LCLL Ash, 19,6 et 20,8 °C pour la cendre volante.

Cela confirme que les températures trouvées se trouvent dans la tranche de température d'un béton frais qui se situe entre 10 et 25 °C (Fixit, 2011). Les résultats obtenus sont alors prometteurs pour la température, car elles concordent à la température d'un béton frais (Tableau 3.11).

Tableau 3.11 Mesures des teneurs en air, des affaissements et des températures des bétons normaux, produits avec du LCLL Ash et de la cendre volante.

Formulations	Teneur en air (%)	Affaissement (cm)	Température (°C)
Béton « normal »	3,70	7,0	20,5
5 % LCLL Ash	2,8	4,2	19,8
10 % LCLL Ash	3,3	5,0	21,0
15 % LCLL Ash	3,1	5,5	20,8
5 % CV	2,5	4,5	19,6
10 % CV	2,8	5,2	20,7
15 % CV	3,0	5,5	20,8

### 3.2.3 Mesures des résistances à la compression du remblai en pâte cimenté

Les mesures de compressions uniaxiales obtenues au cours des différents essais sont résumées dans les Tableau 3.12, Tableau 3.13 et Tableau 3.14 et représentées par les courbes ci-dessous (Figure 3.7). Les mesures obtenues ont permis de tracer les courbes de résistance à la compression. Ces courbes montrent le comportement mécanique du remblai en pâte cimenté produit avec du LCLL Ash et sans le LCLL Ash.

Tableau 3.12 Mesures de résistance à la compression du remblai en pâte cimenté

Mélange	Âge	Dimensions (mm)			Masse (g)	Charge maximale (kN)	Résistance en compression (MPa)	
		Hauteur	L	l				
100GU	1	3	48,7	50,5	50,6	244	0,6	0,2
	2		49,1	50,5	50,5	247	0,6	0,2
	3		47,6	49,4	49,7	232	0,6	0,3
	4	7	49,1	49,6	49,7	240	0,7	0,3
	5		49,1	49,5	49,4	239	0,8	0,3
	6		48,7	50,4	50,2	247	0,8	0,3
	7	28	49,1	50,7	50,6	251	0,8	0,3
	8		47,4	49,7	50,0	253	0,9	0,4
	9		49,1	50,7	50,6	248	0,9	0,4
	10	56	48,6	50	50	238	0,9	0,4
	11		49,4	50,7	50,7	252	0,9	0,4
	12		48,0	49,6	49,8	238	1,2	0,5

Tableau 3.13 Mesures de résistance à la compression du remblai en pâte cimenté

Mélange	Âge	Dimensions (mm)			Masse (g)	Charge maximale (kN)	Résistance en compression (MPa)	
		Hauteur	L	l				
60S- 20LCLL- 20GU	1	3	49,7	50,1	50,0	244	0,4	0,2
	2		49,9	50,9	50,1	257	0,4	0,2
	3		48,0	50,1	50,1	228	0,4	0,2
	4	7	48,3	50,1	49,1	234	0,9	0,4
	5		49,3	50,1	49,2	236	0,8	0,3
	6		51,1	50,1	51,3	245	0,9	0,3
	7	28	51,0	50,1	51,2	250	0,9	0,3
	8		51,1	51,2	51,3	241	1,2	0,5
	9		51,1	51,2	51,3	241	1,3	0,5
	10	56	50,1	49,9	49,7	241	1,3	0,5
	11		50,2	49,3	49,7	241	1,3	0,5
	12		51,0	50,8	50,9	241	1,3	0,5

Tableau 3.14 Mesures de résistance à la compression du remblai en pâte cimenté

Mélange	Âge	Dimensions (mm)			Masse (g)	Charge maximale (kN)	Résistance en compression (MPa)	
		Hauteur	L	l				
80S-20GU	1	3	48,8	50,2	50,2	236	0,7	0,3
	2		50,3	51,1	50,7	250	0,7	0,3
	3		51,5	50,9	51,5	252	0,8	0,3
	4	7	50,2	50,5	50,1	235	1,4	0,6
	5		50,8	50,2	50,2	245	1,5	0,6
	6		51,9	50,4	51,6	244	1,4	0,5
	7	28	51,9	50,4	51,6	250	2,2	0,8
	8		52	50,4	51,6	241	2,2	0,8
	9		51,9	50,4	51,6	240	2,3	0,9
	10	56	51,8	50,3	50,4	242	2,5	0,9
	11		52,7	50,2	50,2	240	2,5	1,0
	12		51,9	50,2	50,1	242	2,5	1,0

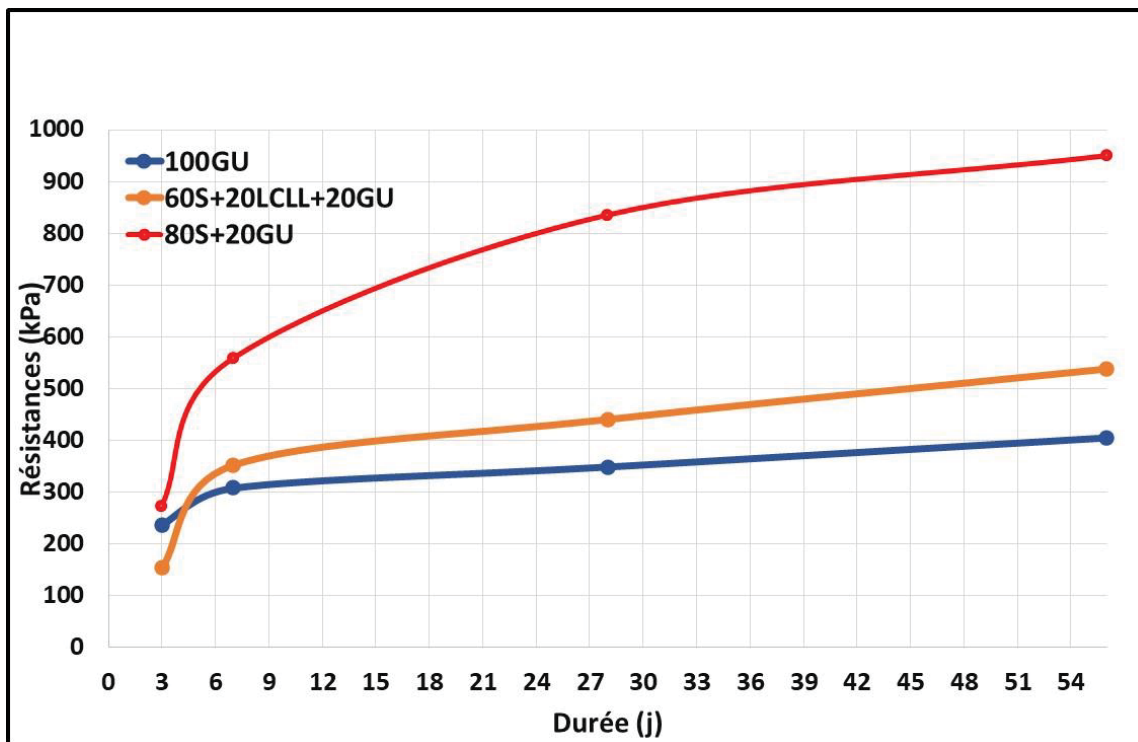


Figure 3.7 Résultats UCS de 56 jours de cure de temps des échantillons

En appliquant une contrainte normale à la compression sur l'échantillon, la résistance maximale est de 950 kPa pour le 80S+20GU, 550 kPa pour 60S+20LCLL Ash+20GU

et plus faibles à 350 kPa pour le 100GU. Les résultats montrent que l'ajout du LCLL Ash sur la recette amène une diminution de la résistance à la compression par rapport au remblai fabriqué avec du laitier et une augmentation par rapport au remblai fabriqué avec 100% du ciment de type General Use ou GU. Cela permet de confirmer que l'utilisation du laitier de hauts fourneaux dans le remblai présente une meilleure résistance à la compression que le LCLL Ash. Les valeurs trouvées confirment les résultats de la littérature. En 2003, Benzaazoua et al. ont étudié à court, moyen et long terme le comportement du remblai en pâte cimenté en utilisant différents liants. L'objectif des auteurs était de déterminer le type de liant qui apporte les meilleures résistances à la compression du remblai (Figure 3.7). Les auteurs ont conclu que l'utilisation de la cendre volante dans le remblai en pâte cimenté ne présente pas de bonnes résistances à la compression (Benzaazoua, Belem, Ouellet, & Fall, 2003). Les liants comme le ciment Portland et la fumée de silice présentent de bonnes résistances à la compression. Les auteurs confirment également que les meilleures résistances à la compression sont atteintes lorsque la recette est composée de ciment et de laitier de hauts fourneaux.

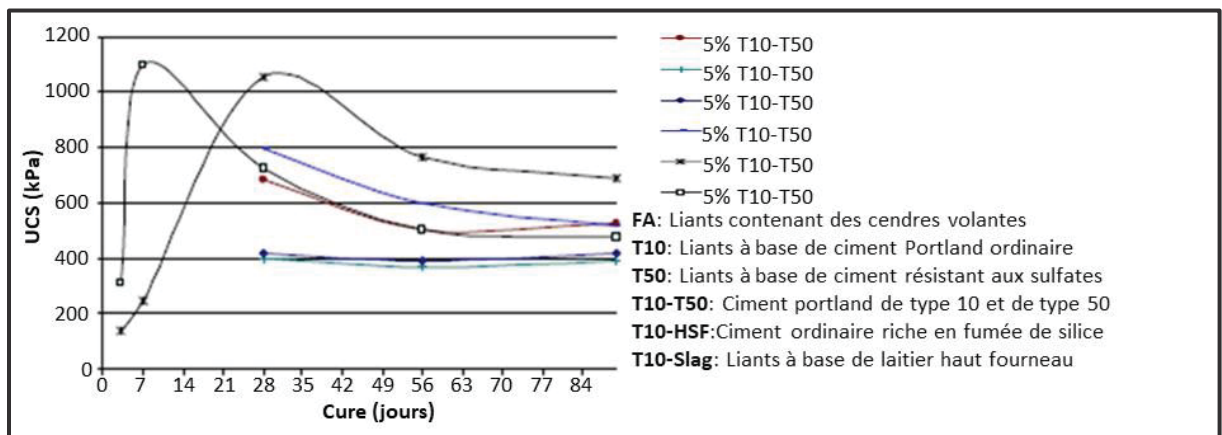


Figure 3.8 Effet du type de liant sur la résistance mécanique des remblais en pâte tirée de Benzaazoua et al., (2003, p.8)



## CONCLUSION

Cette étude a permis de mettre en valeur l'évaluation des brasques traitées tant dans le domaine environnemental que mécanique. Cette recherche a permis d'évaluer le potentiel d'utilisation des brasques traitées à travers l'analyse de son cycle de vie lorsqu'elles sont en substitution au ciment dans le béton et aussi dans les productions de béton et de remblai en pâte cimenté au laboratoire. L'objectif principal de cette étude a été de faire une évaluation des brasques traitées en tant que substitut au ciment dans les productions des matériaux de construction et minier afin de voir si elles peuvent être utilisées comme ajout cimentaire au niveau de la production de ces derniers. Une revue de la littérature approfondie est réalisée pour comprendre les mécanismes, les propriétés des matériaux étudiés. À travers les expériences de laboratoire, les valeurs de résistances à la compression sont obtenues au niveau des productions de remblai en pâte cimenté et du béton. Les résultats sur les mesures de teneur en air ont montré que les teneurs en air trouvées sont inférieures à celles d'un béton à l'état frais qui se situe généralement entre 5 et 8 %. Une étude d'analyse des impacts environnementaux a permis de déterminer les impacts liés à l'utilisation des brasques traitées dans la fabrication du béton. Des analyses de sensibilité sont réalisées pour voir les impacts du transport de la cendre volante et de la calcination du LCLL Ash.

Les principales conclusions des différentes étapes de ce travail sont les suivantes :

### **- Analyse de cycle de vie des brasques traitées dans la production du béton**

Les résultats de l'ACV mettent en évidence que l'utilisation du LCLL Ash est une solution prometteuse et intéressante pour réduire les impacts environnementaux liés à la production du béton. L'étude comparative des impacts environnementaux montre que les utilisations du LCLL Ash et du LCLL Ash calciné présentent un avantage environnemental par rapport à la cendre volante dans la production du béton. De plus, le ciment est l'un des matériaux qui contribuent fortement aux impacts et présente aussi un bilan carbone remarquablement élevé dû à la phase de calcination de ses matières premières à 1450°C pour fabriquer le clinker. Le ciment est le composant qui génère la plus grande quantité de CO<sub>2</sub> dans la production du béton. Dans la modélisation, le LCLL Ash entraîne des émissions de GES moyennes voir faibles (soit 0,8 kgCO<sub>2</sub>eq pour le LCLL Ash). L'eau et le plastifiant sont des éléments qui ne génèrent que

très de peu d'impact. Le gravier et le sable présentent des émissions moyennes au niveau des différentes recettes. Leurs émissions sont comprises entre 12,7 et 13,3 kgCO<sub>2</sub>eq pour le gravier ; 10,90 et 9,3 kgCO<sub>2</sub>eq pour le sable. Au niveau de l'analyse de contribution le gravier et le sable présentent des impacts assez élevés au niveau de la transformation des terres naturelles. Leurs contributions sont comprises entre 40,05 et 40,83% pour le gravier ; 34,5 et 35,2% pour le sable.

– **Remblai minier** : L'utilisation du LCLL Ash dans la recette du remblai en pâte cimenté sera une première à travers ce projet. Elle a permis de montrer l'importance de l'usage des brasques traitées comme ajout cimentaire dans la composition de la recette du remblai en pâte cimenté. Les résultats basés sur les essais en compressions montrent que l'ajout du LCLL Ash dans la recette du remblai amène une diminution de la résistance à la compression comparativement à l'ajout du laitier de hauts fourneaux qui donne une résistance assez élevée du remblai. Le LCLL Ash n'améliore pas la résistance à la compression du remblai en pâte cimenté.

– **Béton** : Le LCLL Ash a le potentiel pour garder les mêmes résistances à la compression que celles du béton ordinaire aux différents âges de durcissement (7 j, 28 j, et 90 j). Les résultats ont montré que la résistance à la compression du béton produit avec le LCLL Ash est similaire à celle du béton produit avec de la cendre volante d'où un résultat prometteur pour l'industrie de la construction d'utiliser les brasques traitées comme ajout cimentaire dans la production du béton.



## RECOMMANDATIONS

Afin d'utiliser les brasques traitées dans la production des matériaux de construction comme ajout cimentaires à l'échelle laboratoire ou industrielle, Il serait intéressant à l'avenir de faire d'autres recherches au :

### **Niveau de l'analyse de cycle de vie :**

Les ACV présentées dans ce mémoire sont exploratoires. Toutes les analyses de cycle de vie effectuées peuvent être refaites avec d'autres hypothèses et cela peut influencer sur les résultats. Il serait intéressant de :

- Changer certaines hypothèses qui dépendront du choix de l'analyste et peuvent influencer sur les résultats comme le choix du type de four, les taux de substitutions du LCLL Ash et les distances de transports c'est-à-dire chercher d'autres usines de productions des composants du béton beaucoup plus proches de l'usine de production du béton de Montréal.
- Réaliser les analyses de cycle de vie dans les productions non seulement du remblai en pâte cimenté, mais, aussi d'autres types de remblais.
- Réaliser des analyses de sensibilités basées sur le transport de la cendre volante provenant d'autres usines de production en Italie et dans d'autres pays de production autres que l'Italie afin d'évaluer les impacts.
- Réaliser des analyses de sensibilité basée sur la calcination en utilisant différents types de fours. Les résultats trouvés dans ce mémoire sur les analyses de sensibilités basées sur la calcination des brasques montrent de faibles variations des impacts selon les températures de calcination choisies, des vérifications ultérieurs de ces résultats seront nécessaires en changeant les hypothèses de calcination.

### **Niveau expérimental :**

- Réaliser des tests de lixiviation pour déterminer si le remblai relargue des polluants chimiques qui peuvent jouer un rôle important sur ses propriétés lorsqu'il est mélangé avec les ajouts cimentaires comme les brasques traitées, les cendres volantes et la cendre de biomasse (Coussy, Benzaazoua, Bussière, Blanc, & Moszkowicz, 2013; Fried, 2006; MOSZKOWICZ, Blanc, Bussière, Benzaazoua, & Coussy, 2013).

- Mettre en place d'un protocole de lavage des brasques traitées afin de réduire les alcalis présents dans ce dernier. Ce travail va permettre de réduire les endommagements des matériaux fabriqués avec des brasques contenant des alcalis (Fournier, Sanchez, & Beauchemin, 2015).
- Réaliser des tests d'affaissement pour évaluer la consistance du RPC (Belem, Benzaazoua, & Bussière, 2003; Creber, McGuinness, Kermani, & Hassani, 2017; Ouattara, 2017).
- Comparer les résistances à la compression en utilisant le laitier haut fourneau dans les productions du remblai en pâte cimenté et dans le béton. Les résultats obtenus seront ensuite comparés avec les résistances à la compression de ces mêmes matériaux fabriquées avec les brasques traitées et la cendre volante.
- Déterminer les résistances à la compression des brasques traitées calcinées serait intéressant. Elle permettra de déterminer la meilleure résistance à la compression à laquelle correspond la brasque traitée calcinée à une certaine température.
- Réaliser des tests de durabilité, de niveau de détérioration ou de dégradation, pour déterminer les effets des composants (granulats et ajouts cimentaires) sur les propriétés physico-mécaniques du béton (Pradelle, 2017; Tahar, 2022; Tebbal, 2017). Les résultats de ces tests vont permettre de fournir des informations sur la durée de vie et l'usage de ce type de béton.

**Niveau normatif :**

- Réaliser des essais supplémentaires de laboratoire et sur le terrain pour déterminer la durée de vie de l'unité fonctionnelle de 1 m<sup>3</sup> de béton, particulièrement les tests de la réaction alcali-silice pour confirmer les usages de ce type de béton et les choix de granulats.

## ANNEXE I

### DÉFINITION DES NORMES UTILISÉES DANS L'ÉTUDE

#### ➤ Les normes ISO 14040 et ISO 14044

Ce sont des normes qui déterminent le principe, le cadre, les exigences et lignes directrices de l'analyse de cycle de vie d'un service, de la fabrication d'un produit ou d'un procédé sur l'ensemble de son cycle de vie (Dewandre, 2017). En 1997-2000, l'Organisation internationale de normalisation a publié un cadre systématisé pour réaliser une ACV. Parmi les normes publiées, ils avaient les normes ISO 14040, 14041, 14042 et 14043 (Pryshlakivsky & Searcy, 2013). Ainsi, en 2006, après une mise à jour de ces normes, ISO a fusionné les normes 14040 et 14044, d'où il y a eu des améliorations significatives en ce qui concerne le langage et la clarté. Le cadre d'ISO 14040 et 14044 possède désormais quatre étapes distinctes qui comprennent la définition de l'objectif et de la portée, l'analyse d'inventaire, l'évaluation d'impact et l'interprétation (Salomone, Mondello, Lanuzza, & Micali, 2005). Cependant, la série ISO 14040 est définie par le système de management environnemental (SME) centrée sur ISO 14001 comme un outil supplémentaire, donc ISO 14040 informe ISO 14001 sur l'exigence d'amélioration continue sa norme afin de maintenir une certaine affinité. La norme ISO 14040 forme une boucle de rétroaction avec d'autres normes (figure) pouvant apporter une certification du produit ou service étudié (Cooper, Fava, & Baer, 2008; Fet & Sørsgård, 1998; Finkbeiner, Inaba, Tan, Christiansen, & Klüppel, 2006).

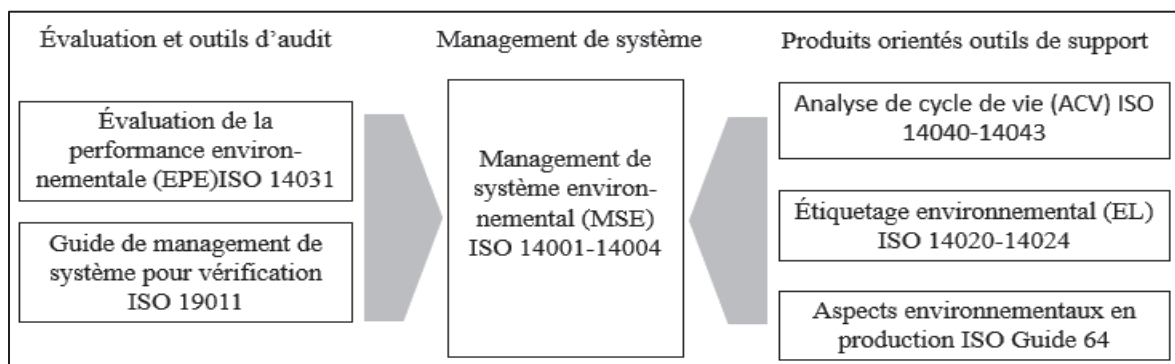


Figure-AI-1 Les normes ISO 14040 par rapport aux autres plateformes ISO au moment de leur développement (adaptée de Fet & Sørsgård, 1998 tirée de Pryshlakivsky et Searcy, (2013, p.116)

Jusqu'à nos jours, il faut noter que les normes ISO d'ACV (ISO 14040 et ISO 14044) représentent les normes de normalisation internationale appropriées et pertinentes à l'échelle mondiale sur l'ACV et symbolisent sa constitution. Les normes ISO 14040 et 14044 sont toujours utilisées et valables aujourd'hui après leur développement en 2006. Bien que leurs établissements aient été cruciaux mondialement pour la prise de décision et par les parties prenantes, ces normes ont atteint un certain niveau dans les études d'ACV au cours de la dernière décennie et continuent d'être de plus en plus pertinentes.

- **Les normes CSA (Association) :** c'est un organisme d'élaboration de norme accrédité par le CCN (Conseil canadien des normes). C'est aussi un organisme certifié sans but lucratif. Elles répondent aux besoins de l'industrie, du gouvernement, des consommateurs et d'autres parties intéressées du Canada ainsi qu'à ceux du marché mondial (Association, 2006). Dans le cadre de la production du béton, elle vise à protéger la santé et la sécurité des concepteurs du béton qui les utilise pour faire leurs gâchées de béton, à améliorer leur qualité de vie, à protéger l'environnement et à faciliter la mise sur le marché du béton produit qu'est considéré comme un produit de qualité fabriqué selon les normes CSA. L'application de la norme CSA permet aux concepteurs de respecter les exigences de la conception du béton, à savoir la sélection des matériaux, le calcul des paramètres et la construction des structures. Les concepteurs de béton doivent s'assurer obligatoirement de la conformité durant tout le processus.
- **Normes ASTM :** Les normes ASTM sont des normes qui ont été créées pour déterminer et résoudre les problèmes qui peuvent être liés à la destruction de la qualité du béton fabriqué, à savoir l'attaque aux sulfates, l'humidité, l'air, l'eau, l'abrasion, le gel, etc. Dans la production du béton, plusieurs numéros de norme ASTM sont utilisés comme la norme ASTM C39 qui est utilisée depuis plus de 80 ans comme une norme industrielle pour les mesures de résistance à la compression d'éprouvettes cylindriques. Il existe aussi les normes ASTM F2170 et ASTM F2659, utilisées pour mesurer l'humidité excessive dans le béton. La norme ASTM C231 utilisée pour mesurer la masse volumique et la teneur en air. L'ASTM C1202 qui consiste à mesurer la perméabilité aux ions chlorures d'un béton et aussi d'estimer l'interconnectivité des pores dans le béton. L'ASTM C418 et C779 servent à déterminer la résistance à l'abrasion du béton. Certaines activités comme le freinage

des véhicules, l'utilisation des produits adhésifs sur le béton et le lavage permanent à haute pression peuvent affecter le béton et apporter sa destruction rapidement. Cependant, en considérant les exigences de la norme de l'ASTM C779, il est possible de mesurer sur des surfaces de bloc de béton la résistance du béton à l'abrasion dont les valeurs doivent être > 35 MPa à 28 j (Ali, Naganathan, & Mahalingam, 2021). La norme ASTM C1012 utilisée pour les mesures de la résistance aux sulfates du béton. Elle consiste à mesurer la teneur des produits d'hydratations du liant, spécialement avec les hydrates de calcium aluminate pour former de l'ettringite (sulfonate de calcium) expansif qui peut provoquer d'énormes fissures sur le béton et mener à sa destruction.



## ANNEXE II

### ANALYSES COMPARATIVES

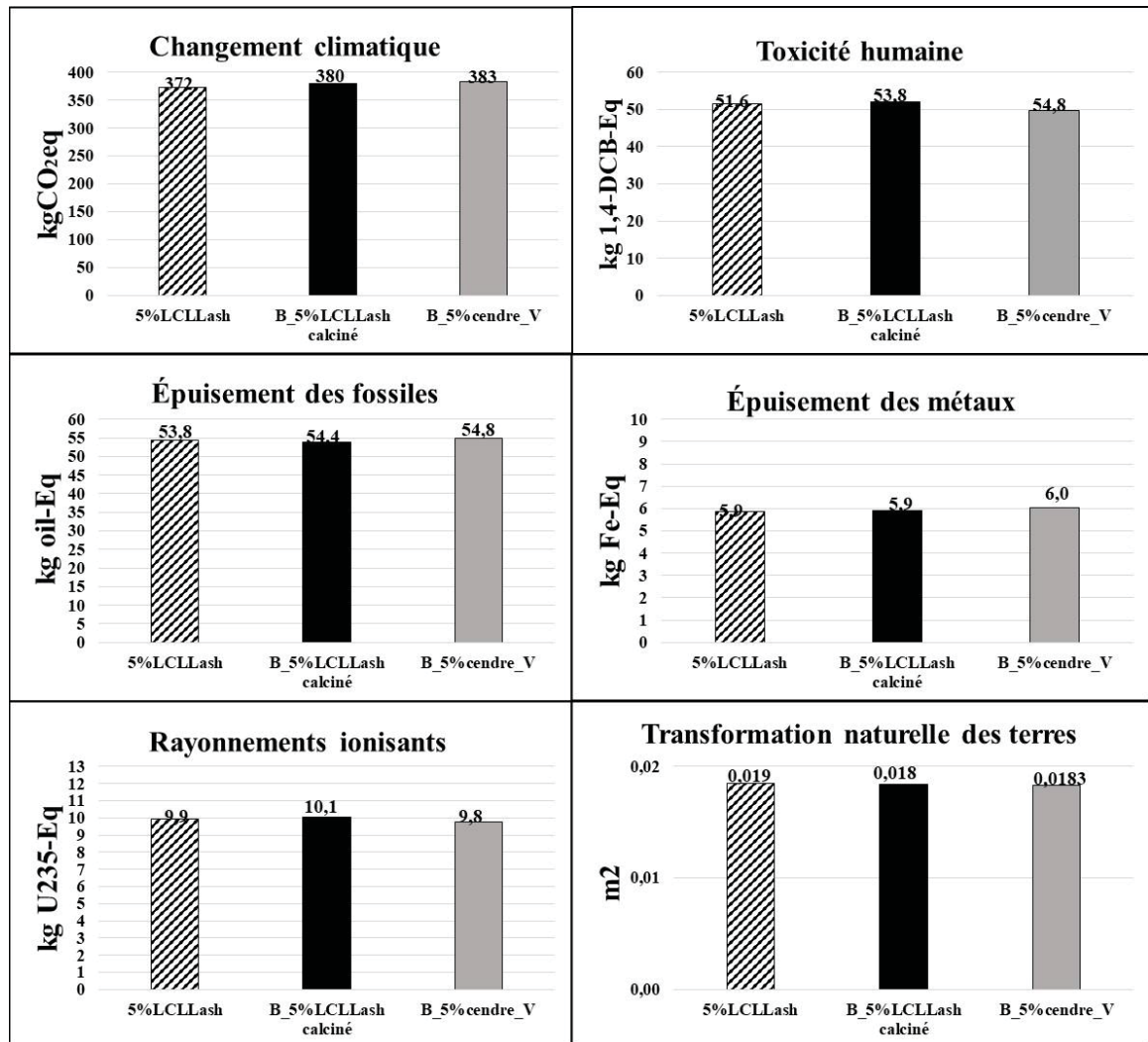


Figure-AII-1 Comparaisons des types de bétons fabriqués avec 5 % de LCLL Ash, de LCLL Ash calciné et de cendre volante

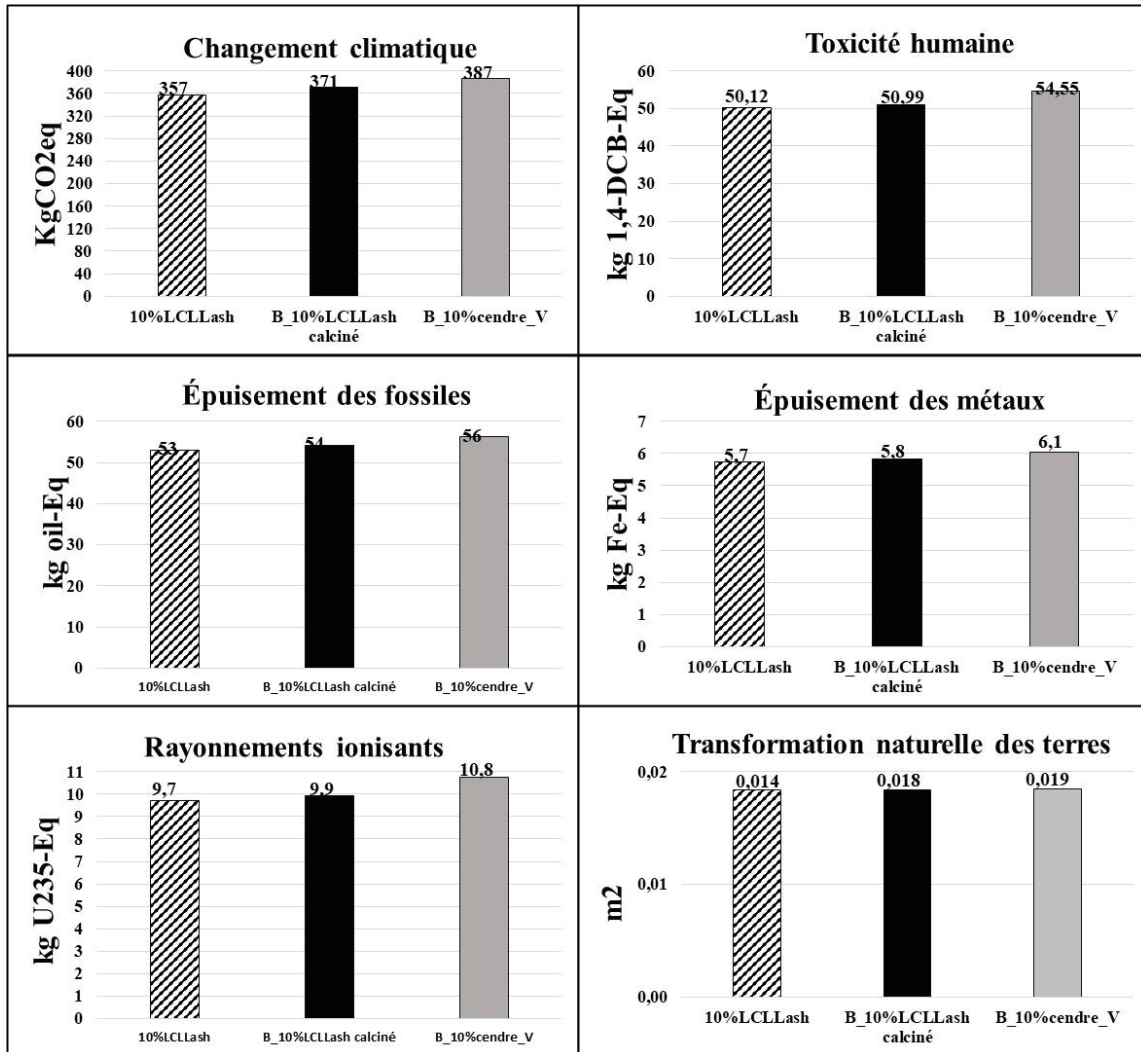


Figure-AII-2 Comparaisons des types de bétons fabriqués avec 10 % de LCLL Ash, de LCLL Ash calciné et de cencre volante



Tableau-AII-1 Analyse de comparaison des catégories d'impacts avec faibles valeurs d'impacts

<b>Eutrophisation de l'eau douce (kg P-Eq)</b>	0,03	0,03	0,04
<b>Épuisement de l'eau (m3)</b>	0,6	0,6	0,7
<b>Écotoxicité marine (kg 1,4-DCB-Eq)</b>	1,1	1,1	1,2
<b>Acidification terrestre (kg SO2-Eq)</b>	0,8	0,8	0,9
<b>Formation de particules (kg PM10-Eq)</b>	0,4	0,4	0,4
<b>Écotoxicité terrestre (kg 1,4-DCB-Eq)</b>	0,04	0,04	0,03
<b>Formation d'oxydants photochimiques (kg NMVOC)</b>	0,8	0,8	0,9
<b>Eutrophisation marine (kg N-Eq)</b>	0,3	0,3	0,3
<b>Occupation des terres agricoles (m2a)</b>	0,03	0,03	0,03
<b>Écotoxicité en eau douce (kg 1,4-DCB-Eq)</b>	1,0	1,0	1,1



## ANNEXE III

### ANALYSES DE CONTRIBUTION

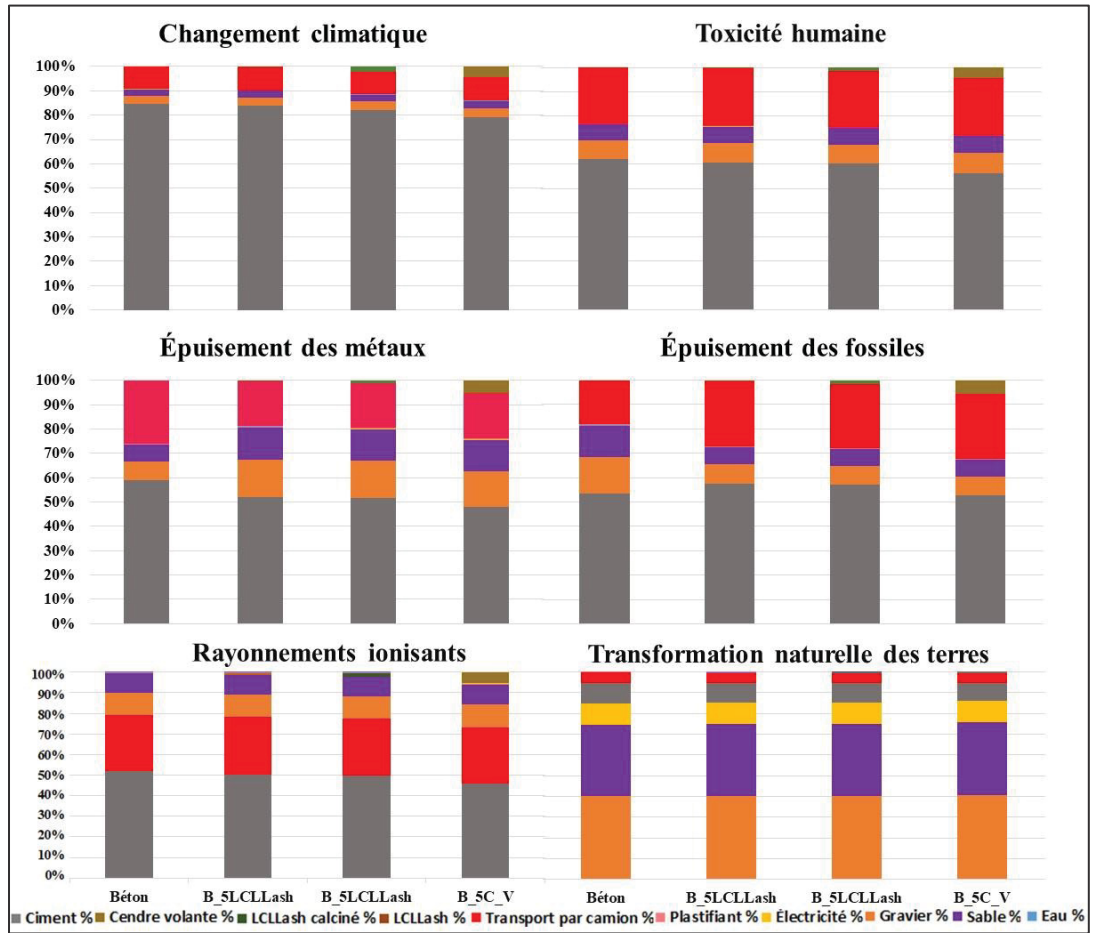


Figure-AIII-1 Analyse de contribution de 5 % de LCLL Ash, de LCLL Ash calciné et de la cendre volante dans la fabrication du béton

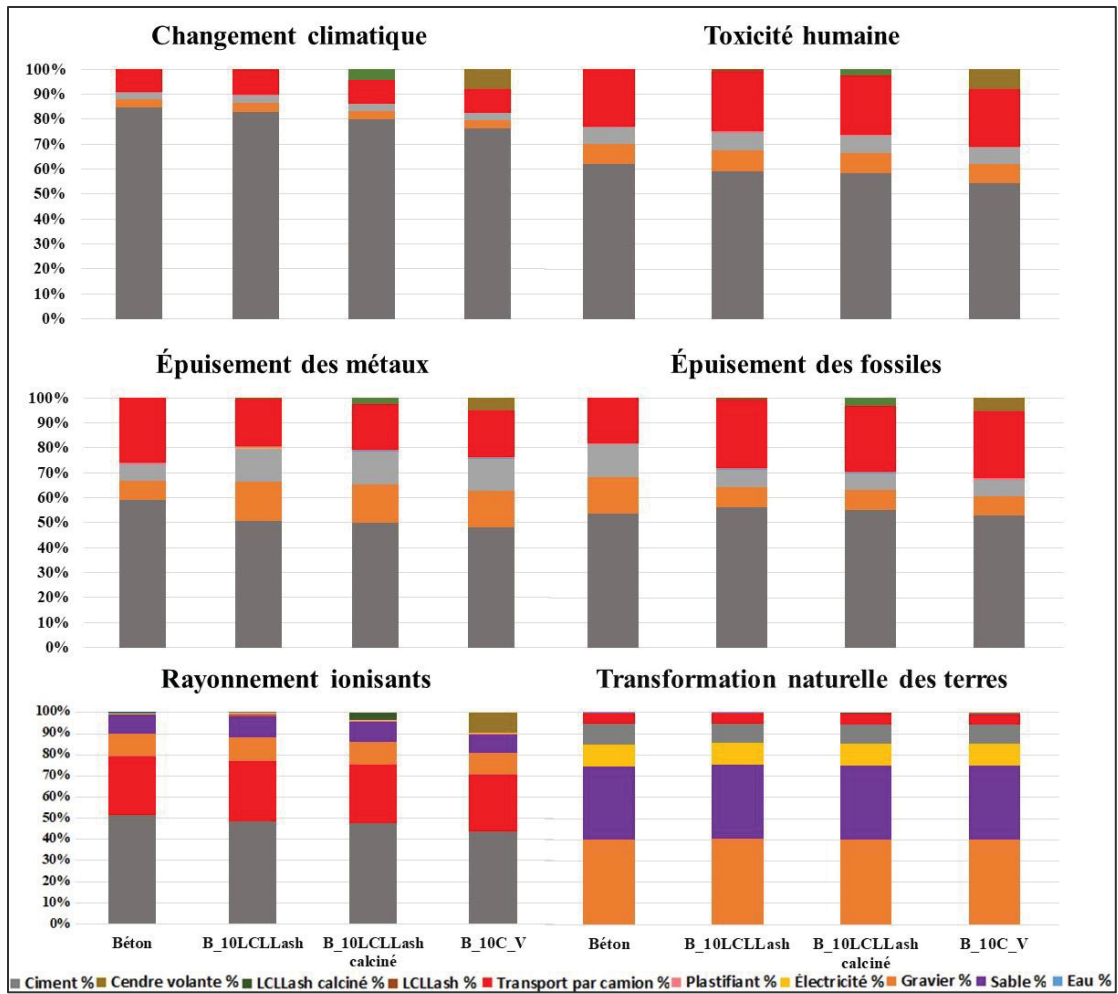


Figure-AIII-2 Analyse de contribution de 10 % de LCLL Ash, de LCLL Ash calciné et de la cendre volante dans la fabrication du béton

## ANNEXE IV

### RÉSULTATS DES MESURES DE RÉSISTANCE À LA COMPRESSION DU BÉTON

Tableau-AIV-1 Résultats des mesures de résistances à la compression à 7 jours de cure

<b>Béton de référence</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3947	198,8	192,77	101,8	102	102,2	265,73	33,83
Échantillon 2	3968,9	200,04	199,7	101,83	102,08	102,04	272,39	34,68
Échantillon 3	3905,6	195,94	195,92	101,89	102,3	102,15	272,95	34,75
<b>Béton avec 5 % CV</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3982,2	201,63	201,7	101,2	101,52	101,65	246,91	31,44
Échantillon 2	3935,2	198,36	198,03	101,99	101,66	101,51	263,24	33,52
Échantillon 3	3930,2	198,64	198,58	101,97	101,38	101,26	259,3	33,015
<b>Béton avec 10 % CV</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3889,5	198,85	198,78	101,5	101,28	101,2	246,26	31,35
Échantillon 2	3878,6	195,49	195,42	101,81	101,64	101,46	281,89	30,80
Échantillon 3	3920	199,81	199,79	102	101,55	101,41	252,83	32,19
<b>Béton avec 15 % CV</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3898,8	199,55	199,53	101,06	100,97	100,99	260,75	33,2
Échantillon 2	3874,7	199,63	199,55	101,01	100,98	101,22	260	33,11
Échantillon 3	3912,2	198,2	198,21	101,75	101,6	101,53	255,69	32,56
<b>Béton avec 5 % LCLL Ash</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3982,5	198,6	198,31	102,03	102,08	102,31	294,16	37,45
Échantillon 2	3883,7	199,09	199,1	101,27	100,83	100,9	276,85	35,25
Échantillon 3	3935	198,99	198,7	101,5	101,16	101,34	280,45	35,71
<b>Béton avec 10 % LCLL Ash</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3919,4	197,7	197,71	102,02	101,61	101,41	263,80	33,59
Échantillon 2	3911,3	198,02	198,04	101,27	101,28	101,31	269,48	34,31
Échantillon 3	3974,9	200,05	200,01	101,62	101,57	101,84	264,65	33,70
<b>Béton avec 15 % LCLL Ash</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3918,5	199,85	199,8	102,04	102,03	102,1	246,54	31,4
Échantillon 2	3875,5	198,78	198,66	102,2	102,11	102,06	249,03	31,71
Échantillon 3	3847	197,36	197,22	101,46	101,4	101,37	269,81	34,53

Tableau- AIV-2 Résultats des mesures de résistances à la compression à 28 jours de cure

<b>Béton de référence</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3964,1	198,55	198,49	101,96	101,9	101,84	323,11	41,14
Échantillon 2	3946,2	197,99	197,9	101,37	101,33	101,3	323,95	41,25
Échantillon 3	3943,6	196,98	197,76	101,32	101,4	101,26	323,85	41,1
<b>Béton avec 5 % CV</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3918,8	198,65	198,59	101,78	101,71	101,32	296,32	38,88
Échantillon 2	3921,5	199,12	199,28	101,19	101,23	101,61	305,32	37,73
Échantillon 3	4038,7	202,69	202,59	101,72	101,64	101,52	313,3	39,89
<b>Béton avec 10 % CV</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3946,9	200,09	200,16	101,53	101,3	101,28	300,82	38,30
Échantillon 2	3897,9	196,77	196,7	101,88	101,57	101,39	322,59	41,07
Échantillon 3	3956,1	199,7	199,77	101,66	101,58	101,77	310,72	39,56
<b>Béton avec 15 % CV</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3969	200,46	200,54	101,28	101,24	101,41	324,6	41,08
Échantillon 2	4098,1	205,91	205,63	101,62	101,61	101,63	334,74	41,06
Échantillon 3	3917	197,71	197,1	101,95	101,47	101,63	338,63	41,02
<b>Béton avec 5 % LCLL Ash</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3945,9	198,46	198,37	101,4	101,46	101,55	339,85	43,27
Échantillon 2	3841,5	194,96	194,93	100,92	100,94	100,66	326,20	41,53
Échantillon 3	3941,6	198,68	198,48	101,6	101,48	101,53	344,22	43,83
<b>Béton avec 10 % LCLL Ash</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3940,9	197,67	197,67	102,21	101,78	101,6	327	41,6
Échantillon 2	3806,9	194,9	194,92	100,97	100,47	100,4	338,6	43,1
Échantillon 3	3945,5	198,62	198,56	101,66	101,57	101,7	335	42,7
<b>Béton avec 15 % LCLL Ash</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3837,4	196,4	196,37	101,51	101,37	101,25	353,13	45,0
Échantillon 2	3921	199,41	199,27	102,14	102,15	102,09	347,74	44,3
Échantillon 3	3855,9	200,68	200,7	100,85	100,66	100,67	339,48	43,2

Tableau- AIV-3 Résultats des mesures de résistances à la compression à 90 jours de cure

<b>Béton de référence</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3854,9	196,56	196,4	100,99	101,05	101,04	370,02	45,372
Échantillon 2	3934,3	197,53	197,45	101,87	101,74	101,59	392,914	48,179
Échantillon 3	3895,1	195,81	195,88	101,53	101,49	101,42	375,181	46,005
<b>Béton avec 5 % CV</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3969	200,46	200,54	101,28	101,24	101,41	388,645	48,013
Échantillon 2	4098,1	205,91	205,63	101,62	101,61	101,63	361,341	44,64
Échantillon 3	3917	197,71	197,1	101,95	101,47	101,44	408,199	50,429
<b>Béton avec 10 % CV</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3965,9	199,56	199,54	101,84	101,91	102	377,855	46,242
Échantillon 2	3943	198,63	198,62	101,97	102	101,86	383,485	46,931
Échantillon 3	3945,4	198,19	198,26	102,23	101,75	101,63	404,666	49,523
<b>Béton avec 15 % CV</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	4075	202,24	202,26	102,4	102,17	102,24	404,43	49,262
Échantillon 2	3841,4	198,16	198,17	100,73	101,71	100,69	400,192	48,746
Échantillon 3	3888,2	196,59	196,54	101,69	101,52	101,44	440,079	53,604
<b>Béton avec 5 % LCLL Ash</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3910,4	197,23	197,84	101,28	101,23	101,16	394,088	48,228
Échantillon 2	3258,8	196,74	196,73	101,59	100,77	100,88	382,265	46,782
Échantillon 3	3980,7	198,24	198,27	102,04	101,99	101,93	401,463	49,31
<b>Béton avec 10 % LCLL Ash</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3935,5	197,52	199,42	101,61	101,43	101,35	386,159	47,24
Échantillon 2	3954,9	199,39	197,5	101,61	101,49	101,23	405,23	49,573
Échantillon 3	3966,6	199,37	199,41	101,87	101,6	101,71	386,394	47,268
<b>Béton avec 15 % LCLL Ash</b>	<b>m</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>D1</b>	<b>D2</b>	<b>D3</b>	<b>F</b>	<b><math>\sigma</math></b>
Échantillon 1	3917,4	199,95	199,79	101,94	102,01	102,18	403,255	49,701
Échantillon 2	3822,4	196,23	196,28	101,38	101,59	101,82	411,544	50,722
Échantillon 3	3886,6	197,01	196,89	102,21	102,31	102,33	429,768	52,968





## ANNEXE V

### FORMULATION DU BÉTON PAR SUBSTITUTIONS DE DIFFÉRENTS POURCENTAGES DES BRASQUES TRAITÉES AU CIMENT

Tableau-AV-1 Échantillonnage pour la production du béton au laboratoire

Mélange		Béton référence			
		0,018 00	m <sup>3</sup>	18	L
		dosage		masse	
			m <sup>3</sup>		
<b>Matériaux (SSS)</b>					
Ciment		350,0	kg/m <sup>3</sup>	6,30	kg
LCLL-ash		0,00	kg/m <sup>3</sup>	0,00	kg
Cendre volante		0,00	kg/m <sup>3</sup>	0,00	kg
Sable		775,6	kg/m <sup>3</sup>	13,96	kg
Pierre 5-10 mm		581,8	kg/m <sup>3</sup>	20,94	kg
Pierre 10-14 mm		223,6	kg/m <sup>3</sup>	4,03	kg
Pierre 14-20 mm		299,4	kg/m <sup>3</sup>	5,39	kg
<b>Eau + adjuvants</b>	<b>dosage</b>	unité	ml		
Eau	157,00	kg/m <sup>3</sup>		2,83	kg
Superplastifiant	300,00	ml/ 100 kg	18,9	21,0	g
<b>Teneur en eau</b>					
Teneur en eau, sable				0,0	%
Absorption, sable				0,8	%
Eau à corriger, sable				-0,11	kg
Teneur en eau, pierre				0,0	%
Absorption, pierre				0,9	%
Eau à corriger, pierre				-0,3	kg
<b>Eau à ajouter</b>				<b>3,21</b>	<b>kg</b>

Tableau- AV-2 Échantillonnage pour la production du béton au laboratoire  
avec 5 % de LCLL Ash

Mélange		Béton 5 % LCLL Ash			
Volume		0,018 00	m <sup>3</sup>	18	L
		dosage		masse	
			m <sup>3</sup>		
<b>Matériaux (SSS)</b>					
Ciment		332,5	kg/m <sup>3</sup>	5,99	kg
LCLL-ash		17,50	kg/m <sup>3</sup>	0,32	kg
Cendre volante		0,00	kg/m <sup>3</sup>	0,00	kg
Sable		775,6	kg/m <sup>3</sup>	13,96	kg
Pierre 5-10 mm		581,8	kg/m <sup>3</sup>	10,47	kg
Pierre 10-14 mm		223,6	kg/m <sup>3</sup>	4,03	kg
Pierre 14-20 mm		299,4	kg/m <sup>3</sup>	5,39	kg
<b>Eau + adjuvants</b>	<b>dosage</b>	unité	ml		
Eau	157,00	kg/m <sup>3</sup>		2,83	kg
Superplastifiant	300,00	ml/ 100 kg	18,9	21,0	g
<b>Teneur en eau</b>					
Teneur en eau, sable				0,0	%
Absorption, sable				0,8	%
Eau à corriger, sable				-0,11	kg
Teneur en eau, pierre				0,0	%
Absorption, pierre				0,9	%
Eau à corriger, pierre				-0,2	kg
<b>Eau à ajouter</b>				<b>3,12</b>	<b>kg</b>

Tableau- AV-3 Échantillonnage pour la production du béton au laboratoire  
avec 10 % de LCLL Ash

Mélange		Béton 10 % LCLL Ash			
Volume		0,018 00	m <sup>3</sup>	18	L
	dosage			masse	
			m <sup>3</sup>		
<b>Matériaux (SSS)</b>					
Ciment		315,0	kg/m <sup>3</sup>	5,67	kg
LCLL-ash		35,00	kg/m <sup>3</sup>	0,63	kg
Cendre volante		0,00	kg/m <sup>3</sup>	0,00	kg
Sable		775,6	kg/m <sup>3</sup>	13,96	kg
Pierre 5-10 mm		581,8	kg/m <sup>3</sup>	10,47	kg
Pierre 10-14 mm		223,6	kg/m <sup>3</sup>	4,03	kg
Pierre 14-20 mm		299,4	kg/m <sup>3</sup>	5,39	kg
<b>Eau + adjuvants</b>	<b>dosage</b>	unité	ml		
Eau	157,00	kg/m <sup>3</sup>		2,83	kg
Superplastifiant	300,00	ml/ 100 kg	18,9	21,0	g
<b>Teneur en eau</b>					
Teneur en eau, sable				0,0	%
Absorption, sable				0,8	%
Eau à corriger, sable				-0,11	kg
Teneur en eau, pierre				0,0	%
Absorption, pierre				0,9	%
Eau à corriger, pierre				-0,2	kg
<b>Eau à ajouter</b>				<b>3,12</b>	<b>kg</b>

Tableau- AV-4 Échantillonnage pour la production du béton au laboratoire  
avec 15 % de LCLL Ash

Mélange		Béton 15 % LCLL Ash			
Volume		0,018 00	m <sup>3</sup>	18	L
		dosage		masse	
			m <sup>3</sup>		
<b>Matériaux (SSS)</b>					
Ciment		297,5	kg/m <sup>3</sup>	5,36	kg
LCLL-ash		52,50	kg/m <sup>3</sup>	0,95	kg
Cendre volante		0,00	kg/m <sup>3</sup>	0,00	kg
Sable		775,6	kg/m <sup>3</sup>	13,96	kg
Pierre 5-10 mm		581,8	kg/m <sup>3</sup>	10,47	kg
Pierre 10-14 mm		223,6	kg/m <sup>3</sup>	4,03	kg
Pierre 14-20 mm		299,4	kg/m <sup>3</sup>	5,39	kg
<b>Eau + adjuvants</b>	<b>dosage</b>	unité	ml		
Eau	157,00	kg/m <sup>3</sup>		2,83	kg
Superplastifiant	300,00	ml/ 100 kg	18,9	21,0	g
<b>Teneur en eau</b>					
Teneur en eau, sable				0,0	%
Absorption, sable				0,8	%
Eau à corriger, sable				-0,11	kg
Teneur en eau, pierre				0,0	%
Absorption, pierre				0,9	%
Eau à corriger, pierre				-0,2	kg
<b>Eau à ajouter</b>				<b>3,12</b>	<b>kg</b>

## ANNEXE VI

### FORMULATIONS DU BÉTON PAR SUBSTITUTIONS DE DIFFÉRENTS POURCENTAGES DE LA CENDRE VOLANTE

Tableau-VI-1 Échantillonnage pour la production du béton  
au laboratoire avec 5 % de cendre volante

Mélange		Béton 5% cendre volante			
Volume		0,018 00	m <sup>3</sup>	18	L
		dosage		masse	
			m <sup>3</sup>		
<b>Matériaux (SSS)</b>					
Ciment		332,5	kg/m <sup>3</sup>	5,99	kg
LCLL-ash		0,00	kg/m <sup>3</sup>	0,00	kg
Cendre volante		17,50	kg/m <sup>3</sup>	0,32	kg
Sable		775,6	kg/m <sup>3</sup>	13,96	kg
Pierre 5-10 mm		581,8	kg/m <sup>3</sup>	10,47	kg
Pierre 10-14 mm		223,6	kg/m <sup>3</sup>	4,03	kg
Pierre 14-20 mm		299,4	kg/m <sup>3</sup>	5,39	kg
<b>Eau + adjuvants</b>	<b>dosage</b>	unité	ml		
Eau	157,00	kg/m <sup>3</sup>		2,83	kg
Superplastifiant	300,00	ml/ 100 kg	18,9	21,0	g
<b>Teneur en eau</b>					
Teneur en eau, sable				0,0	%
Absorption, sable				0,8	%
Eau à corriger, sable				-0,11	kg
Teneur en eau, pierre				0,0	%
Absorption, pierre				0,9	%
Eau à corriger, pierre				-0,2	kg
<b>Eau à ajouter</b>				<b>3,12</b>	<b>kg</b>

Tableau-VI-2 Échantillonnage pour la production du béton  
au laboratoire avec 10 % de cendre volante

Mélange	Béton 10% cendre volante				
Volume		0,018 00	m <sup>3</sup>	18	L
	dosage			masse	
			m <sup>3</sup>		
<b>Matériaux (SSS)</b>					
Ciment		315,0	kg/m <sup>3</sup>	5,67	kg
LCLL-ash		0,00	kg/m <sup>3</sup>	0,00	kg
Cendre volante		35,00	kg/m <sup>3</sup>	0,63	kg
Sable		775,6	kg/m <sup>3</sup>	13,96	kg
Pierre 5-10 mm		581,8	kg/m <sup>3</sup>	10,47	kg
Pierre 10-14 mm		223,6	kg/m <sup>3</sup>	4,03	kg
Pierre 14-20 mm		299,4	kg/m <sup>3</sup>	5,39	kg
<b>Eau + adjuvants</b>	<b>dosage</b>	unité	ml		
Eau	157,00	kg/m <sup>3</sup>		2,83	kg
Superplastifiant	300,00	ml/ 100 kg	18,9	21,0	g
<b>Teneur en eau</b>					
Teneur en eau, sable				0,0	%
Absorption, sable				0,8	%
Eau à corriger, sable				-0,11	kg
Teneur en eau, pierre				0,0	%
Absorption, pierre				0,9	%
Eau à corriger, pierre				-0,2	kg
<b>Eau à ajouter</b>				<b>3,12</b>	<b>kg</b>

Tableau-VI-3 Échantillonnage pour la production du béton  
au laboratoire avec 15 % de cendre volante

Mélange	Béton 15% cendre volante				
Volume		0,018 00	m <sup>3</sup>	18	L
	dosage			masse	
			m3		
<b>Matériaux (SSS)</b>					
Ciment		297,5	kg/m <sup>3</sup>	5,36	kg
LCLL-ash		0,00	kg/m <sup>3</sup>	0,00	kg
Cendre volante		52,50	kg/m <sup>3</sup>	0,95	kg
Sable		775,6	kg/m <sup>3</sup>	13,96	kg
Pierre 5-10 mm		581,8	kg/m <sup>3</sup>	10,47	kg
Pierre 10-14 mm		223,6	kg/m <sup>3</sup>	4,03	kg
Pierre 14-20 mm		299,4	kg/m <sup>3</sup>	5,39	kg
<b>Eau + adjuvants</b>	<b>Dosage</b>	unité	ml		
Eau	157,00	kg/m <sup>3</sup>		2,83	kg
Superplastifiant	300,00	ml/ 100 kg	18,9	21,0	g
<b>Teneur en eau</b>					
Teneur en eau, sable				0,0	%
Absorption, sable				0,8	%
Eau à corriger, sable				-0,11	kg
Teneur en eau, pierre				0,0	%
Absorption, pierre				0,9	%
Eau à corriger, pierre				-0,2	kg
<b>Eau à ajouter</b>				<b>3,12</b>	<b>kg</b>





## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ABQ, A. B. Q. I. R. (2014). L'écaillage des béton de surface. *Techno Béton, 3ème édition* ([www.betonabq.org](http://www.betonabq.org)), 4.
- AFNOR, N. (2006). 14040. *Management environnemental—analyse du cycle de vie – Principes et cadres*.
- Aïtcin, P.-C. (2007). *Binders for durable and sustainable concrete*. CRC Press.
- Aïtcin, P.-C. (2016). Portland cement. Dans *Science and Technology of Concrete Admixtures* (pp. 27-51). Elsevier.
- Alatshan, F., Altomate, A., & Rezgui, B. L. (2015). Utilisation de déchets locaux pour la production d'un béton écologique. *JSFM-CMC 2015*.
- Ali, S., Naganathan, S., & Mahalingam, B. (2021). State of the Art Review on Prescriptive & Performance Based Approaches for Concrete Durability. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 12(2), 80-88.
- Amaratunga, L., & Yaschyshyn, D. (1997). Development of a high modulus paste fill using fine gold mill tailings. *Geotechnical & Geological Engineering*, 15(3), 205-219.
- Annor, A. (2002). A study of the characteristics and behaviour of composite backfill material.
- Association, C. S. (2006). *Gestion de la santé et de la sécurité au travail: Norme CSA*.
- ASTM1356-08. Standard Test Method for Assignment of the Glass Transition Temperatures by Differential Scanning Calorimetry.
- ASTM. (2012). ASTM C 618-12. Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete. Dans *Annual book of ASTM standards* (Vol. 04.02.). West Conshohocken (PA).
- ASTM. (2014). Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency. Norme ASTM C305-14. Pensilvania, USA: American Society for Testing and Materials. . *American Society for Testing and Materials*.
- ASTM. (2016). Standard Test Method for Compressive. Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). Norme ASTM 1C109/109M-16a. Pensilvania, USA: American Society for Testing and Materials. *American Society for Testing and Materials*.
- Aubertin, M., Bussière, B., & Bernier, L. (2002). *Environnement et gestion des rejets miniers: Manuel sur cédérom*. Presses Internationales Polytechnique.

- Aubertin, M., Li, L., Arnoldi, S., Belem, T., Bussière, B., Benzaazoua, M., & Simon, R. (2003). Interaction between backfill and rock mass in narrow stopes. *Soil and rock America, 1*, 1157-1164.
- Azam, S., & Li, Q. (2010). Tailings dam failures: a review of the last one hundred years. *Geotechnical news, 28*(4), 50-54.
- Barcelo, L., Kline, J., Walenta, G., & Gartner, E. (2014). Cement and carbon emissions. *Materials and Structures, 47*(6), 1055-1065.
- Bautista, B. E., Ongpeng, J. M. C., & Razon, L. F. (2022). LCA of Mortar with Calcined Clay and Limestone Filler in RC Column Retrofit. *Sustainability, 14*(3), 1175.
- Befesa. (2019). Salt Slags and SPL Recycling Services. <https://www.befesaaluminium.com/web/en/nuestros-procesos/detalle/Salt-slags-and-SPL-Recycling-Services/>.
- Belaoura, M., & Brara, A. (2020). Analyse critique des essais de compression dynamique sur le béton, critical analysis dynamic compression on concrete. *ResearchGate*.
- Belem, T., Benzaazoua, M., & Bussière, B. (2000). Mechanical behaviour of cemented paste backfill. Dans *Proc. of 53rd Canadian Geotechnical Conference, Montreal* (pp. 373-380).
- Belem, T., Benzaazoua, M., & Bussière, B. (2003). Utilisation du remblai en pâte comme support de terrain. Partie I: De sa fabrication à sa mise en place sous terre. Dans *Symp. int. Apres-mines, GISOS, Gisos ed., Nancy, France* (pp. 5-7).
- Belhocine, A., & Nagoudi, N. (2014). *Etude expérimentale d'un mortier avec ajouts minéraux*.
- Benaichi, E. H. (2009). *Etude des bétons à base des sables de démolition et ajouts minéraux actifs* (Université Mohamed Khider Biskra).
- Benkaddour, M., Aoual, F. K., & Semcha, A. (2009). Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle. *Nature & Technology, 1*(1), 63.
- Benzaazoua, M., Belem, T., Ouellet, S., & Fall, M. (2003). Utilisation du remblai en pâte comme support de terrain. Partie II: comportement à court, à moyen et à long terme. *Proceedings of Apres-mines*.
- Benzaazoua, M., Bussière, B., Demers, I., Aubertin, M., Fried, É., & Blier, A. (2008). Integrated mine tailings management by combining environmental desulphurization and cemented paste backfill: Application to mine Doyon, Quebec, Canada. *Minerals engineering, 21*(4), 330-340.

- Benzemmouri, Z. (2021). *Influence des ajouts cimentaires sur la cinétique d'hydratation des ciments.-Etude bibliographique* (university of M'sila).
- Bernier, R., Li, M. G., & Moerman, A. (1999). Effects of tailings and binder geochemistry on the physical strength of paste backfill. *Proc. of Sudbury*, 99, 1113-1122.
- Birry, L., Leclerc, S., & Poirier, S. (2016). The LCL&L process: A sustainable solution for the treatment and recycling of spent potlining. Dans *Light Metals 2016* (pp. 467-471). Springer.
- Birry, L., S. Leclerc, and S. Poirier. (2016). The LCL&L process: A sustainable solution for the treatment and recycling of spent potlining. in *Light Metals 2016*. , Springer. p. 467-471.
- Brial, V. J., Ouellet-Plamondon, C., Tran, H., Conciatori, D., & Sorelli, L. (2020). Evaluation of the reactivity of treated spent pot lining from primary aluminum production as cementitious materials. (*Resources, Conservation and Recycling*), 89.
- Brial, V. J., Tran, H., Sorelli, L., Conciatori, D., & Ouellet-Plamondon, C. (2021). Evaluation of the reactivity of treated spent pot lining from primary aluminum production as cementitious materials. *Resources, Conservation and Recycling*, 170, 105584.
- Broek, S., & Øye, H. A. (2018). Fundamentals of managing spent potlining (SPL). Dans *Proceedings of the 36th International ICSOBA Conference, Belem, Brazil*.
- Bussière, B. (2007). Colloquium 2004: Hydrogeotechnical properties of hard rock tailings from metal mines and emerging geoenvironmental disposal approaches. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(9), 1019-1052.
- CAC. (2016). General Use (GU) and Portland-Limestone (GUL) cements. *Cement Association of Canada*, ([www.cement.ca](http://www.cement.ca)), 17.
- Cao, S., Yilmaz, E., & Song, W. (2018). Evaluation of viscosity, strength and microstructural properties of cemented tailings backfill. *Minerals*, 8(8), 352.
- CIRAIG. (2022). Rapport technique de projet d'affichage d'empreinte carbone à la cafétéria de Polytechnique Montréal; phase pilote : quantification de l'empreinte carbone des plats de l'été 2022 (Rapport).
- Colangelo, F., Navarro, T. G., Farina, I., & Petrillo, A. (2020). Comparative LCA of concrete with recycled aggregates: a circular economy mindset in Europe. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(9), 1790-1804.

- Cooper, J., Fava, J., & Baer, S. (2008). Life cycle assessments of buildings in North America: Demand and supply. *Journal of industrial ecology*, 12(1), 7-9.
- Corominas, L., Byrne, D. M., Guest, J. S., Hospido, A., Roux, P., Shaw, A., & Short, M. D. (2020). The application of life cycle assessment (LCA) to wastewater treatment: A best practice guide and critical review. *Water Research*, 184, 116058.
- Coussy, S. (2011). *Stabilisation de rejets miniers pollués à l'arsenic à l'aide de sous-produits cimentaires: étude de l'influence de la cristalochimie sur le risque de mobilisation des polluants*. Université du Québec en Abitibi-Temiscamingue (Canada).
- Coussy, S., Benzaazoua, M., Bussière, B., Blanc, D., & Moszkowicz, P. (2013). Stabilisation de l'arsenic dans les remblais miniers en pâte cimentée. *Environnement, Ingénierie & Développement*, 4-12.
- CQ. (2017). Ciment Portland. *Ciment Québec*, (<https://www.cimentquebec.com/ciment/gamme-de-ciment/ciment-portland/>).
- Creber, K. J., McGuinness, M., Kermani, M. F., & Hassani, F. P. (2017). Investigation into changes in pastefill properties during pipeline transport. *International Journal of Mineral Processing*, 163, 35-44.
- CSA. (2009b). Compressive strength of cylindrical concrete specimens. *Canadian Standards Association CSA A23.2-9C*, Toronto.
- CSA. (2015a). Affaïssement du béton *Association Canadienne de normalisation (CAN/CSA Standard No. A23.2-5C)*.
- CSA. (2015b). Confection et cure des éprouvettes de béton destinées aux essais de compression et de flexion. Norme CSA A.23.2-3C. Mississauga, ON: Association Canadienne de normalisation. *Association Canadienne de normalisation (CSA)*.
- CSA. (2015c). Détermination de la teneur en air du béton plastique par la méthode de pression d'air. *Association canadienne de normalisation (CAN/CSA Standard No. A23.2-4C)*.
- CSA. (2018). Cementitious materials for use in concrete CSA 30001. *Canadian Standard Association*, 03.
- CSA. (2019a). CSA23.2: 19. Procédures d'essai et pratiques normalisées pour le béton. *Canadian Standards Association, CSA23.2*.
- CSA. (2019b). *CSA A23.1 :F19/CSA A23.2F19 - Béton : constituants et exécution des travaux/Procédures d'essai et pratiques normalisées pour le béton*. Toronto, ON. : Canadian Standard Association.

- CSA. (2020). Temperature of freshly mixed hydraulic cement concrete. *Canadian Standard Association*, (<https://www.youtube.com/watch?v=SWcrd8aH1Lk>).
- De Larrard, F., & Ferraris, C. F. (1998). Rhéologie du béton frais remanié. III-L'essai au cône d'Abrams modifié. *BULLETIN-LABORATOIRES DES PONTS ET CHAUSSEES*, 53-60.
- Deschamps, J., Simon, B., Tagnit-Hamou, A., & Amor, B. (2018). Is open-loop recycling the lowest preference in a circular economy? Answering through LCA of glass powder in concrete. *Journal of Cleaner Production*, 185, 14-22.
- Dewandre, L. (2017). Analyse de l'impact environnemental de la centrale hydroélectrique du barrage Bacquelaine à Chaudfontaine selon les normes ISO 14 040 et 14 044.
- Di Noi, C., Cirotto, A., & Srocka, M. (2017). OpenLCA 1.7. *Comprehensive User Manual*, GreenDelta GmbH, Berlin, Germany.
- Diani, M. (2015). *The cement of civil society*. Cambridge University Press.
- Dumeignil, S., & Jacques, P.-F. (2023). *Béton normal, résistance à la compression de moins de 55 MPa (n° 10A)*. Montréal: DRPIU, SIRR.
- Emad, M. Z., Mitri, H. S., & Henning, J. G. (2012). Effect of blast vibrations on the stability of cemented rockfill. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 26(3), 233-243.
- Fall, M., Adrien, D., Célestin, J., Pokharel, M., & Touré, M. (2009). Saturated hydraulic conductivity of cemented paste backfill. *Minerals engineering*, 22(15), 1307-1317.
- Fall, M., & Brackebusch, F. (1994). Basics of paste backfill system. *Eng. Min. J*, 46, 1175-1178.
- Fet, A. M., & Sjørgård, E. (1998). Life cycle evaluation of ship transportation—development of methodology and testing. *Aalesund College (HiA) in Cooperation with Det Norske Veritas (DNV)(HiA 10/B101/R-98/008/00)*, 32.
- Finkbeiner, M., Inaba, A., Tan, R., Christiansen, K., & Klüppel, H.-J. (2006). The new international standards for life cycle assessment: ISO 14040 and ISO 14044. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 11(2), 80-85.
- Fixit, G. (2011). Manuel du béton. *Bautoffe mit system*, ([éton-fr](#)), 72.
- Fournier, B., Sanchez, L., & Beauchemin, S. (2015). Outils d'investigation de la réactivité alcalis-granulats dans les infrastructures en béton. *Rapport Final, Ministère des*

*transports du Québec, Service des matériaux d'infrastructure, Secteur béton de ciment, 293.*

Fried, É. (2006). *Étude du phénomène d'hydratation et du comportement à la lixiviation des remblais miniers en pâte cimentés*. École Polytechnique de Montréal.

Gauthier, P. (2018). Réduire les émissions de GES liées à la production du ciment. *Énergie et environnement, 7*.

Geryville, D., Kacimi, L., Cyr, M., & Clastres, P. (2011). Elaboration de pouzzolanes artificielles à partir de déchets industriels pour une substitution partielle du clinker dans le ciment Portland. *INVACO2, Séminaire International, innovation & valorisation en génie civil & matériaux de construction, (1P-048)*.

Ghirian, A., & Fall, M. (2013). Coupled thermo-hydro-mechanical–chemical behaviour of cemented paste backfill in column experiments. Part I: physical, hydraulic and thermal processes and characteristics. *Engineering Geology, 164*, 195-207.

Giraud, P. (2018a). Caractéristiques et types de granulats. *Infociments*, (<https://www.infociments.fr/betons/caracteristiques-et-types-de-granulats>).

Giraud, P. (2018b). Les adjuvants. *Infociments*, (<https://www.infociments.fr/betons/adjuvants>).

Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., De Schryver, A., Struijs, J., & Van Zelm, R. (2009). ReCiPe 2008. *A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, 1*, 1-126.

Guiraud, P. (2018). Les adjuvants : pour des bétons à l'épreuve des chantiers et du temps. *Infociments*, (<https://www.infociments.fr/betons/adjuvants#:~:text=Ces%20adjuvants%20ont%20p%20ur%20fonction,faciliter%20sa%20mise%20en%20œuvre.>).

Guo, M., Gong, G., Yue, Y., Xing, F., Zhou, Y., & Hu, B. (2022). Performance evaluation of recycled aggregate concrete incorporating limestone calcined clay cement (LC3). *Journal of Cleaner Production, 366*, 132820.

Hane, I. (2015). *Caractérisation en laboratoire des remblais en pâte cimentés avec ajout de granulats (stériles concassés)* (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue).

Hassani, F., & Archibald, J. (1998). Mine backfill handbook. *CIM, Montreal, Quebec, Canada*.

Huijbregts, M. A., Steinmann, Z. J., Elshout, P. M., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., . . . van Zelm, R. (2016). ReCiPe 2016: a harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level report I: characterization.

- Hyvert, N. (2009). *Application de l'approche probabiliste à la durabilité des produits préfabriqués en béton* (Université de Toulouse, Université Toulouse III-Paul Sabatier).
- IAI. (2018). *Sustainable Spent Pot Lining Management Guidance*. London, United Kingdom: International Aluminium Institute.
- IEA. (2020). *Cement analysis*. Engineering Failure Analysis.
- infociments. (2018a). Eau. Repéré
- Infociments. (2018b). Le rôle de l'eau dans les fabrications des mortiers et des bétons <https://www.infociments.fr/betons/eau>.
- Jolliet, O., Saadé, M., & Crettaz, P. (2010). *Analyse du cycle de vie: comprendre et réaliser un écobilan* (Vol. 23). PPUR Presses polytechniques.
- Khan, M. I., & Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 30-35.
- Koohestani, B., Bussière, B., Belem, T., & Koubaa, A. (2017). Influence of polymer powder on properties of cemented paste backfill. *International Journal of Mineral Processing*, 167, 1-8.
- Kumar, S., Kumar, R., Bandopadhyay, A., Alex, T., Kumar, B. R., Das, S. K., & Mehrotra, S. (2008). Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement. *Cement and Concrete Composites*, 30(8), 679-685.
- Laldji, S. (2015). Les caractéristiques fondamentales du béton. *École de technologie supérieure*, 42.
- Lecavalier, C. (2021). Ciment McInnis, plus gros pollueur du Québec. *La presse canadienne*, "<https://www.lapresse.ca/actualites/environnement/2021-10-26/emissions-de-ges/ciment-mcinnis-plus-gros-pollueur-du-quebec.php>".
- Li, L., & Aubertin, M. (2012). A modified solution to assess the required strength of exposed backfill in mine stopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(8), 994-1002.
- Lu, H., Qi, C., Chen, Q., Gan, D., Xue, Z., & Hu, Y. (2018). A new procedure for recycling waste tailings as cemented paste backfill to underground stopes and open pits. *Journal of Cleaner Production*, 188, 601-612.

- Manel, B. (2017). *Caractérisation aux moyens des essais destructifs et NDT d'un BAP à base de granulats recyclés et fumée de silice* (UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA).
- Manjunatha, M., Raju, K. V. B., & Sivapullaiah, P. (2021). Effect of PVC Dust on the Performance of Cement Concrete—A Sustainable Approach. Dans *Recent Developments in Sustainable Infrastructure* (pp. 607-617). Springer.
- Marchon, D., & Flatt, R. (2016). Mechanisms of cement hydration. Dans *Science and technology of concrete admixtures* (pp. 129-145). Elsevier.
- MEND. (2017). *Study of tailing management technologies*. Canada: Mine Environment Neutral Drainage MEND.
- Millot, G. (2013). *Geology of clays: weathering· sedimentology· geochemistry*. Springer Science & Business Media.
- Mohamed, B. (2016). Influence de l'ajout du laitier sur les caractéristiques physicochimiques et mécaniques du ciment Portland au laitier (CEM II) et ciment de haut fourneau (CEM III) (Faculte de technologie/UniversiteMohamed Boudiaf-M'sila).
- MOSZKOWICZ, P., Blanc, D., Bussière, B., Benzaazoua, M., & Coussy, S. (2013). Stabilisation de l'arsenic dans les remblais miniers en pâte cimentée. *Environnement, Ingénierie & Développement*.
- Ouattara, D. (2017). *Étude expérimentale des propriétés rhéologiques et mécaniques des remblais miniers en pâte cimentés incorporant des superplastifiants* (Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue).
- Ouattara, D., Yahia, A., Mbonimpa, M., & Belem, T. (2017). Effects of superplasticizer on rheological properties of cemented paste backfills. *International Journal of Mineral Processing*, 161, 28-40.
- Øye, H. A. (2017). Discussion of Industrial Spent Pot Lining Treatment. Dans H. A. Øye (Éd.), *Proceedings of 35th International ICSOBA Conference*, (Vol. 46, pp. 8). ICSOBA conference.
- Patrick, R. (2022). Analyse du cycle de vie (ACV) - Présentation, méthodologie, applications et limites. *Technique de l'ingénieur*, (<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/environnement-et-construction-42552210/analyse-du-cycle-de-vie-acv-g5500/limites-de-l-acv-g5500v2niv10005.html>).
- Pawlek, R. P. (2012). Spent potlining: an update. Dans *Light Metals 2012* (pp. 1313-1317). Springer.



- Penrose, B. (2014). Occupational exposure to cement dust: changing opinions of a respiratory hazard. *Health and history*, 16(1), 25-44.
- Potvin, Y., Thomas, E., & Fourie, A. (2005). Mine backfilling applications and relevant fill parameters. *Handbook on mine fill*, 24-25.
- Pradelle, S. (2017). *Évaluation de la durée de vie du béton armé: approche numérique globale vis-à-vis de la pénétration d'agents agressifs* (Université Paris-Est).
- Pryshlakivsky, J., & Searcy, C. (2013). Fifteen years of ISO 14040: a review. *Journal of Cleaner Production*, 57, 115-123.
- Ramachandran, V. S., Paroli, R. M., Beaudoin, J. J., & Delgado, A. H. (2002). *Handbook of thermal analysis of construction materials*. William Andrew.
- Ramezani pour, A. A. (2014). Cement replacement materials. *Springer, Berlin. doi*, 10, 978-973.
- Rickman, W. S. (1988). Circulating bed combustion of spent potliners. *Light Metals 1988*, 735-743.
- Rico, M., Benito, G., Salgueiro, A., Díez-Herrero, A., & Pereira, H. (2008). Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context. *Journal of hazardous materials*, 152(2), 846-852.
- Salomone, R., Mondello, F., Lanuzza, F., & Micali, G. (2005). An eco-balance of a recycling plant for spent lead-acid batteries. *Environmental Management*, 35(2), 206-219.
- Scrivener, K., Martirena, F., Bishnoi, S., & Maity, S. (2018). Calcined clay limestone cements (LC3). *Cement and concrete research*, 114, 49-56.
- Scrivener, K. L., Juilland, P., & Monteiro, P. J. (2015). Advances in understanding hydration of Portland cement. *Cement and concrete research*, 78, 38-56.
- Shi, C., & Qian, J. (2000). High performance cementing materials from industrial slags—a review. *Resources, Conservation and Recycling*, 29(3), 195-207.
- Shvarzman, A., Kovler, K., Grader, G., & Shter, G. (2003). The effect of dehydroxylation/amorphization degree on pozzolanic activity of kaolinite. *Cement and concrete research*, 33(3), 405-416.
- Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 55(11), 923-932.

- Souchu, P. (2009). Hydratation du ciment Portland. *Setec lerm*, (<http://doc.lerm.fr/lhydratation-du-cimentportland#:~:text=M%C3%A9canismes%20d'hydratation%20d'un%20ciment%20Portland&text=Cette%20p%C3%A9riode%20d%C3%A9bute%20d%C3%A8s%20le,les%20ions%20entrent%20en%20solution.>).
- Tahar, L. (2022). *Etude du comportement physique, mécanique et durabilité des bétons à base des nouvelles additions minérales et des différentes fractions des granulats recyclés traités* (faculté des sciences et de la technologie univ bba).
- Tebbal, N. (2017). *Effet de la nature des granulats sur les propriétés physico-mécaniques et durabilité d'un béton à haute performance* (Université de M'sila).
- Teklay, A., Yin, C., Rosendahl, L., & Bøjer, M. (2014). Calcination of kaolinite clay particles for cement production: A modeling study. *Cement and concrete research*, 61, 11-19.
- Thompson, B. D., Bawden, W. F., & Grabinsky, M. (2012). In situ measurements of cemented paste backfill at the Cayeli Mine. *Canadian Geotechnical Journal*, 49(7), 755-772.
- Tironi, A., Trezza, M. A., Scian, A. N., & Irassar, E. F. (2012). Kaolinitic calcined clays: Factors affecting its performance as pozzolans. *Construction and Building Materials*, 28(1), 276-281.
- Van Hoof, G., Vieira, M., Gausman, M., & Weisbrod, A. (2013). Indicator selection in life cycle assessment to enable decision making: issues and solutions. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 18(8), 1568-1580.
- Veye, C. R. d. (2018). *Full recycling process for aluminium wastes, salt slags and SPL treatment and recovery*. London: IAI SPL Workshop.
- Wang, C., & Villaescusa, E. (2001). Factors influencing the strength of cemented aggregate fill. Dans *Minefill 2001: Proceedings of 7th International Symposium on Mining with Backfill* (Ed. D. Stone, PF) (pp. 81-87).
- Weidema, B., Wenzel, H., Petersen, C., & Hansen, K. (2004). The product, functional unit and reference flows in LCA. *Environmental News*, 70, 1-46.
- Xiapeng, P., Fall, M., & Haruna, S. (2019). Sulphate induced changes of rheological properties of cemented paste backfill. *Minerals engineering*, 141, 105849.
- Yahia, M. (2016). *Contribution à la valorisation d'un déchet de cimenterie (ciment hydraté) pour l'élaboration d'un nouveau ciment* (Université Mohamed Boudiaf-M'sila).

Yilmaz, E., Benzaazoua, M., Belem, T., & Bussière, B. (2009). Effect of curing under pressure on compressive strength development of cemented paste backfill. *Minerals engineering*, 22(9-10), 772-785.